

Anexo 7-2. Distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de Ocoña.



Figura 7-75. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 1 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-76 Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 2 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-77 Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 3 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-78 Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 4 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-79. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 5 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Subcuenca 6



Figura 7-80. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 6 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-81. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 7 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-82. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 8 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-83. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 9 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-84. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 10 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-85. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 11 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-86. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 12 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-87. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 13 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-88. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 14 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-89. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 15 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-90. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 16 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-91. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 17 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-92. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 18 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-93. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 19 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-94. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 20 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Anexo 7-3. Distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de Camaná Majes.



Figura 7-95. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 1 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-96. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 2 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Subcuenca 3



Figura 7-97. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 3 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-98. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 4 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-99. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 5 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-100. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 6 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-101. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 7 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-102. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 8 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-103. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 9 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-104. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 10 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-105. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 11 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-106. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 12 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-107. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 13 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-108. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 14 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-109. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 15 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-110. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 16 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.




Figura 7-111. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 17 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-112. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 18 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-113. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 19 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-114. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 20 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-115. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 21 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-116. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 22 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-117. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 23 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-118. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 24 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-119. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 25 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-120. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 26 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 7-121. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 27 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



CAPÍTULO VIII Escenarios de Cambio climatico



# 8. Escenarios de cambio climatico

## 8.1 Modelos Globales y regionales de cambio climatic

La herramienta principal para estimar las proyecciones climáticas de largo plazo son los modelos climáticos acoplados océano-atmósfera-superficie terrestre, que representan las componentes del sistema climático de la tierra y sus interelaciones.

El sistema climático global es una consecuencia de los intercambios energéticos, humedad, momento y masa entre las componentes océano-atmósfera-superficie, que dan lugar a diferentes tipos de clima.

Los modelos climáticos permiten simular el clima del pasado, actual y futuro. A pesar de su limitada resolución espacial (110-280 km) y la representación suavizada de la cordillera de los andes, presentan avances con el paso de los años en la simulación de los efectos de los procesos físicos a través de mejoras en sus esquemas de parametrización de radiación y convección principalmente. Así como, las interrelaciones y acoplamiento entre las componentes del sistema climático (Acuña et al. 2012).

En la actualidad, los modelos climáticos de largo plazo para proyección del clima futuro llevan implícito las asunciones del curso que tomarán los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Estos escenarios incorporan niveles de incertidumbre en los escenarios climáticos, por lo tanto es importante intercomparar las diferentes variables provenientes de los diferentes modelos en su estado climático de referencia (simulación de control o histórica) para determinar qué modelos representan de manera más aproximada el clima regional y cuan confiables podrían ser sus proyecciones (Acuña et al. 2012). Esta información validada física y estadística, es posteriormente utilizada para estimar proyecciones del clima en el futuro en alta resolución espacial aplicando un modelo regional (downscaling dinámico) y/o en localidades de interés donde existe información real proveniente de datos de instrumental meteorológico (downscaling estadístico).

La información de escenarios climáticos desde modelos globales es información muy gruesa para la toma de decisiones a nivel regional, cuenca y local; por tanto se hace necesaria la reducción de escala espacial y temporal mediante dowscaling.

La técnica downscaling dinámico se basa en el uso de Modelos Climáticos Regionales o de área limitada (RCMs, siglas en inglés), los cuales permiten adaptar las salidas de los Modelos climáticos globales a las características orográficas de una determinada región con una resolución espacial apta para ser utilizada en distintas aplicaciones; en modelos de impactos de rendimientos de cultivos, hidrológicos, hidráulicos, entre otros. Las técnicas dinámicas de reducción de escala, se basan en el uso de modelos regionales de área limitada y tienen la característica de ser físicamente consistentes y demandan mayor capacidad y tiempo de procesamiento computacional (Acuña, D. et al. 2012). Los RCMs, resuelven las ecuaciones dinámicas de la atmósfera y el océano, que relacionadas con los modelos climáticos, sobre una grilla más fina, se obtienen proyecciones climáticas en alta resolución. Estos modelos se utilizan a menudo para la desagregación espacial de las salidas de los modelos de circulación global; aunque se requiere mucho tiempo y demanda computacional para obtener los resultados. Por lo general, sólo un número pequeño de modelos están disponibles para una determinada región de interés (Buytaert W., 2010).

Las técnicas de downscaling estadístico, se basan en hipótesis establecidas donde las relaciones lineales o no lineales cuantitativas entre predictores (de gran escala) y predictandos (de escala local) son invariables frente al cambio climático. En esta técnica es importante conocer a priori modelos conceptuales físicos de la relación entre predictores y predictantes a fin de seleccionar óptimos predictores de gran escala y que contengan buen sustento estadístico. De otro lado, esta técnica por lo general demanda menor tiempo computacional; aunque los métodos no lineales desarrollados



recientemente se basan en complejos algoritmos de optimización no lineal y requieren un mayor tiempo de procesamiento.

En consecuencia, los modelos climáticos globales constituyen herramientas potenciales para la proyección del clima a gruesa resolución espacial, y son necesarios para forzar el downscaling dinámico o como predictores de gran escala de las técnicas estadísticas, para obtener información en alta resolución espacial y temporal.

En el estudio de "Escenarios climáticos y caracterización de la oferta hídrica presente y futura en las cuencas Ocoña y Camana-Majes, Región Arequipa" desarrollado en el marco del Proyecto de Apoyo a la gestión del Cambio climático, los escenarios fueron generados con downscaling dinámico con el WRF a una resolución 16 km y downscaling estadístico a escala local de interés.

Estas técnicas fueron adoptadas en proyectos ejecutados por la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en el marco de Proyectos emblemáticos como Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire (PROCLIM, 2004), Proyecto Regional Andino de Adaptación (PRAA, 2007) y Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (SCNCC, 2008), Programa Nacional de Cambio Climático (PACC, 2012), Proyecto de Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos (SEDAPAL, 2015), entre los principales.

# 8.1.1 Modelización Regional con WRF para generación de escenarios climáticos en la Región Arequipa y cuencas Ocoña y Camana-Majes

La regionalización dinámica para el presente estudio, se llevó a cabo con el modelo Advanced Research WRF (Weather Research and Forecast) versión 3.2, el cual fue forzado con los datos del modelo global HadGEM-ES desarrollado por el Hadley Centre del Reino Unido, el cual representa coherentemente las variables atmosféricas en distintos niveles de presión (Barreto, C., LLacza A., 2015). El Modelo Regional WRF, es un modelo de mesoescala no hidrostático, aplicado tanto en pronóstico operativo como en investigación, fue construido por esfuerzo conjunto de la National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA).

El Advanced Research WRF versión 3.01 fue implementado en SENAMHI el 2008 para pronóstico del tiempo (corto plazo) obteniéndose una buena performance en la predicción de precipitación para el país mostrando resultados satisfactorios en el análisis sinóptico de escala diaria. En el 2010 se implementó la versión 3.2 para la proyección del clima de largo plazo, después de realizar corridas de prueba se adaptó para simular el clima en la región sur andina de Perú a 20 km de resolución espacial, configurándose 18 niveles en la estructura vertical de la atmósfera.

En el 2014 el modelo WRF-ARW se migra a la versión 3.4 y se inicia la corrida para simular los escenarios climáticos al 2045 a escala nacional de 16 km y para el sector central a 5km de resolución espacial, como parte del "Estudio de Vulnerabilidad Climática de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro" en el marco del Convenio Específico de Servicio de Cooperación Técnica entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima, (SENAMHI, 2015).

Los escenarios climáticos de 16 km de resolución espacial posteriormente fueron ampliados su horizonte al 2065 por SENAMHI-SMN en el 2016, el cual es aplicado en el presente estudio para



generar los Escenarios de Cambio Climático en la región Arequipa a 16 km de resolución espacial; Figura 8-1.



Figura 8-1 Modelización climática regional con WRF-ARW V4 para generación de escenarios climáticos a escala nacional a resolución espacial de 16 Km y aplicado para la Región Arequipa y cuencas Ocoña y Camana-Majes en el marco del Proyecto Apoyo a la Gestión del Cambio Climático (línea discontinua). Forzantes del modelo regional WRF-ARW V4 datos numéricos del modelo HadGEM2-ES escenario de altas emisiones RCP8.5. Fuente: SENAMHI-SEDAPAL /DMA-SMN, 2015. Actualizada SENAMHI-SMN, 2017

La Figura 8-2 muestra el flujograma metodológico para la generación de escenarios climáticos.





Figura 8-2 Metodologia para la generación de escenarios de camibo climatico Fuente: SENAMHI-SEDAPAL/DMA-SMN, 2015 actualizado 2017



# 8.1.2 Modelización Regional con WRF para generación de escenarios climáticos en la Región Arequipa y cuencas Ocoña y Camana-Majes

La generación de los escenarios climáticos está sujeta a una variedad de fuentes de incertidumbre que afectan en todos los pasos de sus procesos para su generación, comenzando desde la asunción del curso que tomarán en el futuro las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles que afectan al forzamiento radiativo de los modelos globales, hasta simulación del clima futuro a escala regional con los RCMs para la reducción de escala espacial. Cada paso conducente a la generación de escenarios regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores (Brunet, M. et al. 2009).

Las fuentes de incertidumbre en la evolución futura de las emisiones dependerán de la marcha de la economía, del desarrollo tecnológico, de las fuentes energéticas disponibles, del patrón de consumo energético, demografía, decisiones políticas y las asociadas a los modelos globales de circulación general.

En cuanto a los modelos se basan en distintas formulaciones de las ecuaciones termodinámicas y dinámicas que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas grillas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, y otros, que mejoran en la línea de tiempo.

Las técnicas de reducción de escala (downscaling) estadística también incorporan fuentes de incertidumbre principalmente en los predictores de gran escala que son seleccionado de las salidas de los modelos numéricos globales.

Con el fin de reducir la incertidumbre en la generación de escenarios de cambio climático en este estudio se plantea la aplicación de los modelos globales (HadGEM2-ES, CCSM4, MPI-ESM-LR, entre los principales), que tienen una mejor performance físico y estadístico del clima para la región sudamericana (Barreto C., et al. 2014).

El downscaling dinámico de 16 Km de resolución espacial utiliza como condiciones de entrada las salidas del HadGEM2-ES escenario de altas emisiones RCP8.5. Esta técnica es robustecida con la técnica de downscaling estadístico, debido a su menor costo computacional, se toma como predictores los datos numéricos de HadGEM2-ES, CCSM4, MPI-ESM-LR escenarios de altas RCP 8.5 y moderadas emisiones 4.5 para la generación de escenarios futuros a escala local. Los resultados finalmente son expresados en términos de cambios de temperatura y precipitación con distribución espacio-temporal para el RCP 8.5, y distribución temporal para el segundo RCP 4.5, reduciendo la incertidumbre en las proyecciones, que son recomendables como instrumento técnico para la evaluación de los posibles impactos del cambio de clima, para el fortalecimiento de las estrategias de cambio climático de la Región Arequipa y de las grandes cuencas como Ocoña y Camaná-Majes, y la gestión del cambio climático en las áreas de estudio.

#### 8.2 Escenarios de precipitación y temperatura

Los escenarios de cambio climático para las cuencas de los ríos Ocoña y Camaná-Majes presentados, tienen en cuenta las rutas de concentración representativas para el escenario moderado y de alta emisión de Gases de efecto Invernadero (RCP por sus siglas en inglés, 4.5 y 8.5).



## 8.2.1 Cambios proyectados de precipitación a escala temporal

#### 8.2.1.1 Cambios proyectados de precipitación en la región Arequipa

En las Figuras 8-3 y 8-4 se muestran los Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Punta Atico en la región Arequipa para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para los periodos de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, se observa que los cambios muestran gran variabilidad según la escala de análisis, el escenario RCP 8.5 indican aumentos importantes de precipitación relativo al escenario RCP 4.5. Respecto a la incertidumbre el RCP 8.5 muestra menor incertidumbre debido a que considera metodología más robusta de reducción de escala espacial (dinámica y estadística) respecto al RCP4.5 que solo considera la estadística.

En la escala anual (enero-diciembre), el escenario RCP 8.5 muestra cambios con incrementos de 25 mm hacia el 2040, hacia el 2065 los incrementos llegan a 2 mm. El escenario RCP 4.5 hacia el 2040 muestra cambios más estables en promedio incrementos de 5 mm y hacia el 2065 incrementos que llegan a 10 mm.

#### 8.2.1.2 Cambios proyectados de precipitación en la cuenca Ocoña

En las Figuras 8-5 al 8-8 se muestran los Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Chinchayllapa y Salamanca – cuenca Ocoña, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para los periodos de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, se observa cambios en su variabilidad temporal según la escala de análisis para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, con incrementos al 2065 siendo mayor en DEF.

En la escala anual, en la estación Chinchayllapa los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 hacia el 2065 muestran cambios en una misma dirección de comportamiento con incrementos similares de la cantidad de precipitación.

En la estación Salamanca para todas las escalas analizadas muestran cambios en promedio con tendencia de incremento hacia el 2065 para ambos escenarios.

#### 8.2.1.3 Cambios proyectados de precipitación en la cuenca Ocoña

En las Figuras 8-9 y 8-12 se muestran los Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Aplao y Madrigal – cuenca Camaná, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para los períodos de avenida, estiaje, anual y año hidrológico.

En general, en la estación Aplao se observa cambios variables según la escala de análisis, sin embargo para el escenario RCP 4.5 y principalmente el RCP 8.5 los periodos DEF, MAM, avenidas, anual y año hidrológico, en el tramo 2040 al 2065 muestran una tendencia de reducción de la precipitación. En la estación Madrigal para todas las escalas analizadas muestran cambios en promedio con tendencia de incremento hacia el 2065 para ambos escenarios.





Figura 8-3 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-4 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-5 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Chinchayllapa – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-6 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Chinchayllpa – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-7 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Salamanca – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-8 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Salamanca – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-9 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Aplao – cuenca Camaná, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-10 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Aplao – cuenca Camaná, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-11 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Madrigal – cuenca Camaná, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-12 Cambios de la precipitación 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Madrigal – cuenca Camaná, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico



## 8.2.2 Cambios proyectados en la temperatura mínima a escala temporal

#### 8.2.2.1 Cambios proyectados de temperatura mínima en la región Arequipa

Las Figuras 8-13 y 8-20 muestran los Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Caraveli, Imata, La Angostura y Punta Atico - región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para los períodos de avenida, estiaje, anual y año hidrológico, respectivamente.

En general, en las estaciones emplazadas en la Región Arequipa, la temperatura mínima para todas las escalas analizadas indican cambios en el futuro con aumento gradual en el periodo 2016 a 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5; siendo mayor para el RCP 8.5 que registra en promedio aumento superior al escenario RCP 4.5 en el orden de 0.5 a 1.5 °C.

## 8.2.2.2 Cambios proyectados de temperatura mínima en la cuenca Ocoña

Figura 8-21 y 8-22 muestra los Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para las escalas de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, en la estación Cotahuasi ubicada en la cuenca Ocoña, los cambios en la temperatura mínima en todas las escalas analizadas, indican incrementos, con tendencia ascendente hacia el 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5; siendo el RCP 8.5 el que registra mayores cambios, en promedio hasta en 1°C de incremento superior al escenario RCP 4.5. Hacia el 2031-2040 los cambios del escenario RCP 4.5 y 8.5 son muy cercanos, sin embargo en el tramo 2051 al 2065 la diferencia térmica se amplía significativamente hasta 1.0 °C en promedio, relativo al RCP 4.5.

#### 8.2.2.3 Cambios proyectados de temperatura mínima en la cuenca Camana

Figura 8-23 y 8-28 muestra los Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Aplao, Chivay y Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para las escalas de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, en las estaciones emplazadas en parte de la cuenca Camana, la temperatura mínima para todas las escalas analizadas, muestran incrementos, con tendencia ascendente hacia el 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5; siendo el RCP8.5 el que registra cambios en promedio superior al escenario RCP 4.5. Hacia el 2031 los cambios del escenario RCP 4.5 y 8.5 coinciden, sin embargo del 2051 al 2065 la diferencia térmica se amplían hasta 1.5°C en promedio.





Figura 8-13 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Caraveli – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.





Figura 8-14 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Caraveli – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-15 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Imata – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-16 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Imata – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-17 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación La Angostura – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.





Figura 8-18 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación La Angostura – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-19 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.




Figura 8-20 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-21 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.





Figura 8-22 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-23 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Aplao – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.





Figura 8-24 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Aplao – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.





Figura 8-25 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Chivay – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-26 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Chivay – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-27 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON.





Figura 8-28 Cambios de la temperatura mínima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico.



## 8.2.3 Cambios proyectados en la temperatura máxima a escala temporal

#### 8.2.3.1 Cambios proyectados de temperatura máxima en la región Arequipa

Figura 8-29 y 8-36 muestra los Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Caraveli, Imata, La Angostura y Punta Atico - región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para las escalas de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, en las estaciones emplazadas en parte de la Región Arequipa, la temperatura máxima para todas las escalas analizadas, estiman incrementos con tendencia ascendente hacia el 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, siendo el segundo el que registra incremento superior al escenario RCP 4.5 hasta en 1.5 °C.

### 8.2.3.2 Cambios proyectados de temperatura máxima en la cuenca Ocoña

Figura 8-37 y 8-38 muestra los Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para las escalas de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, en la estación Cotahuasi ubicada en la cuenca Ocoña, la temperatura máxima para todas las escalas analizadas, indican incremento gradual hacia el 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, siendo el RCP 8.5 el que registra los mayores incrementos respecto al escenario RCP 4.5. Hacia el 2031-2040 los cambios del escenario RCP 4.5 y 8.5 coinciden; sin embargo en el tramo 2051 al 2065 la diferencia térmica se amplía de 0.5 °C a 1 °C en promedio.

#### 8.2.3.3 Cambios proyectados de temperatura máxima en la cuenca Camana

Figura 8-39 y 8-44 muestra los Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la estación Aplao, Chivay y Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para las escalas de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

En general, en las estaciones emplazadas en parte de la cuenca Camana, la temperatura máxima para todas las escalas analizadas, muestran cambios con incrementos graduales hacia el 2065 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5, siendo el segundo el que registra cambios en promedio de incremento superior al escenario RCP 4.5. Hacia el 2031-2040 los cambios del escenario RCP 4.5 y 8.5 son muy cercanos y mantienen similar patrón; sin embargo en el tramo 2051 al 2065 la diferencia térmica se amplían de 0.5 hasta 1 °C en promedio.





Figura 8-29 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Caraveli – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-30 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Caraveli – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-31 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Imata – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-32 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Imata – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-33 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación La Angostura – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-34 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación La Angostura – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-35 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-36 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Punta Atico – Región Arequipa, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-37 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-38 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Cotahuasi – cuenca Ocoña, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-39 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Aplao – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-40 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Aplao – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-41 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Chivay – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-42 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Chivay – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico





Figura 8-43 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en Estación Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escala trimestral a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON





Figura 8-44 Cambios de la temperatura máxima 2016-2065 relativo a 1981-2005 en la Estación Sibayo – cuenca Camana, para los escenarios de altas emisiones (RCP8.5) y moderadas emisiones (RCP4.5) de Gases de Efecto Invernadero, escalas: a) avenida, b) estiaje, c) anual y d) año hidrológico



### 8.3 Escenarios de cambios de precipitación y temperatura a escala espacial

La distribución espacial de los escenarios de cambio climático para la región Arequipa y cuencas de los ríos Ocoña y Camaná-Majes, se generaron teniendo en cuenta las rutas de concentración representativas para el escenario de alta emisión de Gases de efecto Invernadero (RCP por sus siglas en inglés, 8.5).

Esta información fue generada en base al promedio entre los escenarios de regionalización estadística y la regionalización dinámica, bajo el escenario de emisión RCP 8.5 datos a punto de estación fueron interpolados con el método kriging ordinario principalmente. Los mapas mostrados indican los cambios a nivel espacial de la precipitación y temperatura del periodo 2036-2065 relativo a 1981-2005 en la región de Arequipa, cuenca Ocoña y cuenca Camaná, para las escalas trimestrales de DEF, MAM, JJA y SON, así como para los periodos de avenida, estiaje, anual y año hidrológico respectivamente.

# 8.3.1 Cambios proyectados de precipitación a escala espacial

### 8.3.1.1 Cambios de precipitación en la región Arequipa

En la región de Arequipa muestran gran variabilidad espacial de acuerdo a la escala temporal de análisis. Se aprecia que durante el periodo de estiaje los cambios son mayormente de incremento en casi toda la región, alcanzando inclusive mayores al 45% sobre su normal actual. Por otro lado, fuertes magnitudes de cambios con reducciones importantes de 45% se identifica en el trimestre de MAM (marzo abril mayo), en las regiones medias de las cuencas y en los distritos de Yauca y Atiquipa en la provincia de Caravelí.

En escala anual, se ha identificado señales de cambios con incrementos mayores a 45% en las provincias de Islay, Camaná y región sur de Caravelí. Asimismo, se detectan cambios en el rango de ±15% en las zonas altas de las provincias de Caylloma y Arequipa y en la región norte de la provincia de Caravelí.

#### 8.3.1.2 Cambios de precipitación en la cuenca Ocoña

Con respecto a la cuenca de Ocoña, se proyecta cambios positivos en toda la cuenca en los periodos de avenida, periodo de estiaje y año hidrológico. Los mayores cambios se aprecian en el periodo de estiaje, con más de 45% de cambio en toda la cuenca, sin embargo esta situación disfraza el periodo seco usual de esta época del año siendo el incremento no relevante.

A escala trimestral, se ha identificado el trimestre MAM es el que presenta cambios hacia reducciones importantes, los cuales se encuentran por debajo del 45% en las regiones medias de la cuenca; mientras que en las zonas más altas se muestran cambio en el rango de -15% al +15% para este trimestre.

A escala anual, muestran cambios mayormente con incrementos hasta de 45%. Los mayores cambios están concentradas en las zonas de Pauza, Ayahuasi y en las región de Bajo Ocoña.

#### 8.3.1.3 Cambios de precipitación en la cuenca Camana

Con respecto a la cuenca Camaná indican que el periodo con los mayores incrementos es el de estiaje, hasta de 45% que se extienden en gran parte de la cuenca. Las reducciones de precipitación más intensas se aprecian en el trimestre de MAM, con reducciones por debajo de 45% en las zonas de Baja Camaná, mientras que en las zonas más altas de la cuenca los cambios se encuentran en el rango de -15% a +15%. En los trimestres de DEF, JJA y SON la señal predominante es de incremento de las precipitaciones en casi toda la cuenca.



En escala anual, los cambios varían de -8% a más del 45% siendo estos mayormente positivos en toda la cuenca. Los cambios más altos se concentran principalmente en las zonas de Cabanaconde y Choco.

# 8.3.2 Cambios proyectados de Temperatura Mínima escala espacial

# 8.3.2.1 Cambios proyectados de Temperatura Mínima en la región Arequipa

En la región Arequipa se proyectan cambios de la temperatura mínima por encima de 2°C y para todas las escalas temporales. Las zonas más altas, en las provincias de Caylloma, Castilla, Condensuyo y La Unión, así como la zona este de la provincia de Arequipa e Islay presentan valores de cambios con aumentos mayores a 2.8°C. En el trimestre JJA los cambios son mayores, superando los 2.8°C en gran parte de las cuencas medias y altas. En el trimestre DEF se presentan los incrementos más bajos; sin embargo, estos siguen siendo superiores a 2°C.

A escala anual indican aumentos de temperatura mínima mayores a 2°C en toda la región y mayores a 2.8°C en las zonas más altas.

# 8.3.2.2 Cambios proyectados de Temperatura Mínima en la Cuenca Ocoña

En la cuenca Ocoña muestran aumento de la temperatura mínima de más de 2°C en todas las escalas temporales. El trimestre con mayores aumentos es JJA destacándose cambios por encima de 2.8°C en gran parte de la zona alta y media de la cuenca. Los periodos en que se presentan los menores cambios corresponden a DEF y periodo de avenida, con valores que se encuentran en el rango de +2°C a +2.4°C.

Analizando a escala anual, se evidencian aumentos de temperatura mínima en el rango de 2.4°C a 2.8°c en las regiones baja y media de la cuenca; mientras que en las zonas más altas los cambios superan los 2.8°C.

# 8.3.2.3 Cambios proyectados de Temperatura Mínima en la Cuenca Camana

En la cuenca Camana, los resultados indican cambios superiores a 2°C sobre todas las escalas temporales, siendo predominante en las zonas altas de la cuenca tales como Chivay y Tisco, donde los cambios superan los 2.8°C. El trimestre JJA presenta mayores cambios con aumento de temperatura mínima en la zona media y alta de la cuenca. El trimestre de DEF y periodo de avenida presenta los menores aumentos.

A escala anual los cambios se encuentran mayormente en el rango de 2°C a 2.8°C en las zonas bajas y medias de las cuencas, mientras que en las zonas más altas los cambios se encuentran por encima de 2.8°C.

#### 8.3.3 Cambios proyectados de la Temperatura Máxima a escala espacial

# 8.3.3.1 Cambios de Temperatura Máxima en la región Arequipa

En la región Arequipa, los cambios de temperatura máxima son mayores a 1.2°C en todas las escalas temporales. En el trimestre DEF se presentan los menores aumentos, siendo estos valores cercanos a 1.2 °C en el distrito de Huambo, provincia de Caylloma; mientras que en el resto de la región los valores de aumento se encuentran en el rango de 2°C a 2.8°C.

El trimestre que presenta el mayor aumento de la temperatura máxima es JJA con valores que superan 2.8°C en gran parte de la región.

#### 8.3.3.2 Cambios de Temperatura Máxima en la cuenca Ocoña

En la cuenca de Ocoña los resultados evidencian aumentos de la temperatura máxima mayormente por encima de 2°C en todas las escalas temporales. Los cambios más bajos se identifican en el



trimestre de DEF en el rango de 2°C a 2.4°C. En el trimestre de JJA se presentan los más grandes cambios con aumentos por encima de 2.8°C en gran extensión espacial de la cuenca media y alta.

A escala anual presentan cambios por encima de 2°C en toda la cuenca, siendo estos más altos en las zonas altas de la cuenca tales como Cotahuasi y Pampamarca, donde superan los 2.8°C

## 8.3.3.3 Cambios de Temperatura Máxima en la cuenca Camana

Para la Cuenca Camana evidencian cambios con aumentos de la temperatura mayor a 1.6°C en todas las escalas temporales, dándose los menores cambios en DEF en el distrito de Huambo. En el trimestre JJA y en el periodo de estiaje se presentan los mayores aumentos de la temperatura máxima superando los 2°C en toda la región; en las zonas más altas como Chivay estos cambios superan los 2.8°C.

A escala anual, los aumentos de temperatura máxima se encuentran por encima de 1.7°C en toda la región. Los valores más bajos de cambios se encuentran concentrados en la cuenca media, cercano al distrito de Huambo. Las zonas más altas mayor a los 3500 msnm presentan aumentos por encima de 2.8°C.

### 8.4 Escenarios de precipitación basados en el Indice SPI cuenca del rio Ocoña

Se ha evaluado los periodos secos y húmedos en la línea base historica 1981-2010 y futura 2011-2065 a escala mensual basado en el índice estandarizado de la precipitación (SPI) para escalas temporales de 3 y 12 meses, a fin de mostrar la evolución temporal de los eventos extremos en las subcuencas de Ocoña (20) y Camana Majes (27).

#### 8.4.1 SPI 3 en las Subcuencas 1 al 20 de la cuenca del río Ocoña

Basados en SPI 3, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 16/20 subcuenca y se presentó de enero a abril 1999 (4 meses). La sub 9 presentó la duración mas extensa y alcanzó 10 meses (set 1998 – junio 1999), intensidad máxima de -3.0 y severidad de -17.3. Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afecto a 15/20 subcuencas se presento durante diciembre 2012 a febrero 2013 (3 meses) con Intensidad máxima de -2.9, el periodo seco mas reciente se presento de febrero a abril 2015 (3meses) que afectó a 20/20 subcuencas con Intensidad máxima de -2.9.

En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 14/20 subcuenca y se presentaria de feb a abril 2027 (3 meses). Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afectaria a 13/20 subcuencas se presentaría durante septiembre a noviembre 2047 (3 meses) con Intensidad máxima de -3.6, el periodo seco mas lejano se presentaría de diciembre 2058 a marzo 2059 (4meses) que afectaría a 8/20 subcuencas con Intensidad máxima de -3.1.

Basados en SPI 3, en general durante la línea base 1981-2016, el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 17/20 subcuenca y se presento de abril a junio 1982 (3 meses). La sub 15 y sub 16 presentaron una la duración más extensa y alcanzó 15 meses (mar 1982 – mayo 1983), intensidad máxima de 2.3 y severidad de 43.4. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectó a 10/20 subcuencas se presentó durante abril a junio 2005 (3 meses) con Intensidad máxima de 3.3, el período húmedo más reciente se presentó de marzo a mayo 2016 (3meses) que afectaría a 8/20 subcuencas con Intensidad máxima de 2.5.

En el Estudio Impacto de ENOS en la Hidrología del Perú (1968-2006) Lavado W., 2009 presenta la clasificación de Niños y Niñas, tomando como base ello, en la cuenca del rio Ocoña en los Niños Fuerte (1982-83, 1991-92,1997-1998) y Niño Moderado (1986-87, 1987-88, 1992-93, 1993-94, 1994-95, 2002-03, 2004-05), Niñas fuertes (1988-89) y Niñas Moderadas (1998-99, 1999-00, 2000-01), el



comportamiento de la precipitación es muy variables con periodos húmedos (color verde), secos (color rojo) y normales (color negrita). Cabe mencionar que se observan también periodos húmedos y secos en los años 2008, 2011, 2013, 2015, 2016.

En la línea base 2011-2065, el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 17/20 subcuenca y se presentaria de mayo a julio 1957 (3 meses). La sub 7 presentaría la duración más extensa y alcanzaría 11 meses (feb a dic 2057), intensidad máxima de 3.1 y severidad de 21.0. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectaría a 17/20 subcuencas se presentaría durante enero a marzo 2054 (3 meses) con Intensidad máxima de 2.3. El periodo húmedo más lejano se presentaría de junio a agosto 2063 (3meses) que afectaría a 8/20 subcuencas con Intensidad máxima de 2.5.

Las Figura 8-45 a 8-47 muestra la evolución temporal del SPI 3 meses en cada una de las subcuencas que comprenden la cuenca del rio Ocoña, en el periodo 1981 a 2065.





Figura 8-45 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 1 al 7 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña





Figura 8-46 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 8 al 14 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña





Figura 8-47 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 1 al 7 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña



# 8.4.2 SPI 12 en las Subcuencas 1 al 20 de la cuenca del rio Ocoña

Basados en SPI 12, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 20/20 subcuenca y se presentó de mayo a diciembre 1999 (8 meses). Las subcuenca 4, 7, 8, 9 y 11 presentó la duración mas extensa y alcanzó 36 meses (mar 1997 – febrero 2000) en este grupo la subcuenca 8 es la que presento la mayor intensidad máxima de -3.3 y severidad de -85.3. Otro periodo seco pero de menor alcance temporal afecto a 13/20 subcuenca, y se presento de enero a agosto de 2012 (8 meses) con una intensidad máxima de -2.1, el periodo seco mas reciente y afecto a 20/20 subcuencas se presento durante febrero a noviembre 2015 (10 meses) con Intensidad máxima de -3.5.

En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 14/20 subcuenca y se presentaria de feb 2044 a enero 2045 (12 meses). Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afectaria a 12/20 subcuencas se presentaría de febrero a setiembre de 2027 (8 meses) con Intensidad máxima de -1.9, el periodo seco mas lejano se presentaría de marzo a julio 2059 (5meses) que afectaría a 15/20 subcuencas con Intensidad máxima de -2.8.

Basados en SPI 12, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 10/20 subcuenca y se presento de abril a setiembre 1982 (6 meses). La sub 14, 15 y 16 presentaron una la duración más extensa y alcanzó 33 meses (mar 1982 – nov 1984), intensidad máxima de 2.5 y siendo la sub 14 la que alcanzao mayor severidad de 51.4. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectó a 13/20 subcuencas se presentó durante abril a julio 2009 (4 meses) con Intensidad máxima de 1.5, el período húmedo más reciente se presentó de abril a diciembre 2016 (9meses) que afectó a 14/20 subcuencas con Intensidad máxima de 2.6.

En el Estudio Impacto de ENOS en la Hidrología del Perú (1968-2006) Lavado W., 2009 presenta la clasificación de Niños y Niñas, tomando como base ello, en la cuenca del rio Ocoña en los Niños Fuerte (1982-83, 1991-92,1997-1998) y Niño Moderado (1986-87, 1987-88, 1992-93, 1993-94, 1994-95, 2002-03, 2004-05), Niñas fuertes (1988-89) y Niñas Moderadas (1998-99, 1999-00, 2000-01), el comportamiento de la precipitación es muy variables con periodos húmedos (color verde), secos (color rojo) y normales (color negrita). Cabe mencionar que se observan también periodos húmedos y secos en los años 2008, 2011, 2013, 2015, 2016.

En la línea base 2011-2065, el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 19/20 subcuenca y se presentaria de febrero a noviembre 2054 (10 meses). La sub 8 presentaría la duración más extensa y alcanzaría 14 meses (ene 2054 a feb 2055), intensidad máxima de 1.5 y severidad de 18.4. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectaría a 14/20 subcuencas se presentaría durante abril a dicembre 2031 (9 meses) con Intensidad máxima de 2.5. El periodo húmedo más lejano se presentaría de marzo a noviembre 2064 (9meses) que afectaría a 8/20 subcuencas con Intensidad máxima de 2.0.

Las Figura 8-48 a 8-50 muestra la evolución temporal del SPI 12 meses en cada una de las subcuencas que comprenden la cuenca del rio Ocoña, en el periodo 1981 a 2065.





Figura 8-48 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 1 al 7 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña





Figura 8-49 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 8 al 14 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña




Figura 8-50 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 15 al 20 comprendidas en la cuenca del rio Ocoña



## 8.5 Escenarios de precipitación basados en el Indice SPI cuenca del rio Camana

### 8.5.1 SPI 3 en las Subcuencas 1 al 27 de la cuenca del río Camana

Basados en SPI 3, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 20/27 subcuenca y se presentó de noviembre 1998 a mayo 1999 (7 meses). La sub 10 presentó la duración mas extensa y alcanzó 10 meses (set 1998 – junio 1999), intensidad máxima de -1.0 y severidad de -15.9. Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afecto a 19/27 subcuencas se presento durante julio a setiembre 2011 (3 meses) con Intensidad máxima de -3.0, el periodo seco mas reciente se presentó de diciembre 2012 a febrero 2013 (3meses) que afectó a 18/27 subcuencas con Intensidad máxima de -2.0.

En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 15/27 subcuenca y se presentaria de abril a julio 2056 (4 meses). Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afectaria a 12/27 subcuencas se presentaría durante junio a agosto 2044 (3 meses) con Intensidad máxima de -3.1, el periodo seco mas lejano se presentaría de octubre a diciembre 2058 (3meses) que afectaría a 13/27 subcuencas con Intensidad máxima de -3.5.

Basados en SPI 3, en general durante la línea base 1981-2011, el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 13/27 subcuenca y se presento de enero a marzo 1993 (3 meses). Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectó a 12/27 subcuencas se presentó durante febrero a abril 1985 (3 meses) con Intensidad máxima de 2.0, el período húmedo más reciente se presentó de marzo a mayo 2016 (3 meses) que afectaría a 15/27 subcuencas con Intensidad máxima de 3.0.

En el Estudio Impacto de ENOS en la Hidrología del Perú (1968-2006) Lavado W., 2009 presenta la clasificación de Niños y Niñas, tomando como base ello, en la cuenca del rio Camana en los Niños Fuerte (1982-83, 1991-92,1997-1998) y Niño Moderado (1986-87, 1987-88, 1992-93, 1993-94, 1994-95, 2002-03, 2004-05), Niñas fuertes (1988-89) y Niñas Moderadas (1998-99, 1999-00, 2000-01), el comportamiento de la precipitación es muy variables con periodos húmedos (color verde), secos (color rojo) y normales (color negrita). Cabe mencionar que se observan también periodos húmedos y secos en los años 2008, 2011, 2013, 2015, 2016.

En la línea base 2011-2065, el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 23/27 subcuenca y se presentaria de enero a marzo 2054 (3 meses). La sub 11 presentaría la duración más extensa y alcanzaría 7 meses (ene a jul 2054), intensidad máxima de 1.7 y severidad de 10.4. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectaría a 20/27 subcuencas se presentaría durante mayo a julio 2057 (3 meses) con Intensidad máxima de 3.6. El periodo húmedo más lejano se presentaría de diciembre 2063 a junio 2064 (7meses) que afectaría a 13/27 subcuencas con Intensidad máxima de 2.9.

Las Figura 8-51 a 8-54 muestra la evolución temporal del SPI 3 meses en cada una de las subcuencas que comprenden la cuenca del rio Camana, en el periodo 1981 a 2065.





Figura 8-51 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 1 al 7 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-52 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 8 al 14 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-53 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 15 al 21 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-54 Evolucion del SPI 3 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 22 al 27 comprendidas en la cuenca del rio Camana



# 8.5.2 SPI 12 en las Subcuencas 1 al 27 de la cuenca del río Camana

Basados en SPI 12, en general durante la línea base 1981-2011, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 26/27 subcuenca y se presentó de marzo a noviembre 1999 (9 meses). La sub 19 presentó la duración mas extensa y alcanzó 35 meses (marzo 1997 – enero 2000), intensidad máxima de -2.7 y severidad de -63.6. Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afecto a 20/27 subcuencas se presento durante febrero a octubre 2012 (9 meses) con Intensidad máxima de -2.2, el periodo seco mas reciente se presentó de abril a setiembre 2015 (6meses) que afectó a 16/27 subcuencas con Intensidad máxima de -2.3 (sub 9).

En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 17/27 subcuenca y se presentaria de mayo a noviembre 2037 (8 meses). Otro periodo seco pero de menor alcance espacial afectaria a 15/27 subcuencas se presentaría durante mayo a noviembre 2053 (7 meses) con Intensidad máxima de -1.8, el periodo seco mas lejano se presentaría de marzo a julio 2059 (5meses) que afectaría a 14/27 subcuencas con Intensidad máxima de -2.2.

Basados en SPI 12, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo húmedo de mayor alcance espacial espacial afectó a 14/27 subcuencas se presentó durante abril a diciembre 1993 (9 meses) con Intensidad máxima de 2.4, y otro de menor alcance que afectó también a 14/27 subcuenca y se presento de abril a noviembre 1984 (8 meses) con Intensidad máxima de 1.7. El período húmedo más reciente se presentó de abril a diciembre 2016 (9meses) que afectaría a 17/27 subcuencas con Intensidad máxima de 2.4.

En el Estudio Impacto de ENOS en la Hidrología del Perú (1968-2006) Lavado W., 2009 presenta la clasificación de Niños y Niñas, tomando como base ello, en la cuenca del rio Camana en los Niños Fuerte (1982-83, 1991-92,1997-1998) y Niño Moderado (1986-87, 1987-88, 1992-93, 1993-94, 1994-95, 2002-03, 2004-05), Niñas fuertes (1988-89) y Niñas Moderadas (1998-99, 1999-00, 2000-01), el comportamiento de la precipitación es muy variables con periodos húmedos (color verde), secos (color rojo) y normales (color negrita). Cabe mencionar que se observan también periodos húmedos y secos en los años 2008, 2011, 2013, 2015, 2016.

En la línea base 2011-2065, el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 22/27 subcuenca y se presentaria de febrero a octubre 2054 (9 meses). La sub 9 presentaría la duración más extensa y alcanzaría 36 meses (ene 2054 a diciembre 2056), intensidad máxima de 2.3 y severidad de 55.1. Otro periodo húmedo pero de menor alcance espacial afectaría a 21/27 subcuencas se presentaría durante junio 2057 a marzo 2058 (10 meses) con Intensidad máxima de 3.5. El periodo húmedo más lejano se presentaría de marzo a octubre 2064 (8meses) que afectaría a 17/27 subcuencas con Intensidad máxima de 2.9.

Las Figura 8-55 a 8-58 muestra la evolución temporal del SPI 12 meses en cada una de las subcuencas que comprenden la cuenca del rio Camana, en el periodo 1981 a 2065.





Figura 8-55 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 1 al 7 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-56 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 8 al 14 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-57 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 19 al 21 comprendidas en la cuenca del rio Camana





Figura 8-58 Evolucion del SPI 12 meses de enero 1981 a diciembre 2065, en las subcuencas 22 al 27 comprendidas en la cuenca del rio Camana



# 8.6 Escenarios de disponibilidad hídrica futura

# 8.6.1 Definiciones preliminares sobre procesos metodológicos

## 8.6.1.1 Clasificacion supervisada de uso de suelo

La Cobertura del suelo es el material en la superficie terrestre, tal como tierra, vegetación, agua, asfalto, etc. Dependiendo de las resoluciones del sensor, el número y tipo de clases de coberturas del suelo que pueden ser identificadas en una imagen, estas pueden variar significativamente.

Una clasificación semi-automática (también llamada una clasificación supervisada) es una técnica de procesamiento de imágenes que permite la identificación de materiales en una imagen a partir de sus firmas espectrales. Existen varios tipos de algoritmos de clasificación, pero el propósito general es producir un mapa temático de la cobertura del suelo. Usualmente, la clasificación supervisada requiere que el usuario seleccione una o más Regiones de Interés (ROIs, o Áreas de Entrenamiento) para cada clase de cobertura del suelo identificada en la imagen. Las ROIs son polígonos dibujados sobre áreas homogéneas de la imagen que se superponen a píxeles pertenecientes a la misma clase de cobertura del suelo.

El procesamiento de imágenes y el análisis espacial con SIG requieren de software específico, tal como el *Semi- Automatic Classification Plugin* (SCP) de QGIS.

• Clases y Macroclases

Estas pueden ser sub-clasificadas en Clases y Macroclases. Las clases de cobertura del suelo se identifican con un código ID arbitrario (identificador). SCP permite la definición de Macroclase ID (MC ID), y Clase ID \*\* (C ID), los cuales son los códigos de identificador de las clases de cobertura del suelo. Una \*\*Macroclase es un grupo de ROIs con diferente ID Clase, lo cual es útil cuando se necesita clasificar materiales que tienen diferente firma espectral en la misma clase de cobertura. Por ejemplo, es posible identificar pasto (i.e. Clase ID = 1 y Macroclase ID = 1) y árboles (ej. Clase ID = 2 y Macroclase ID = 1) como clase vegetación (ej. Macroclase ID = 1). Varios Clase IDs pueden ser asignados al mismo Macroclase ID, pero el mismo Clase ID no puede ser asignado a diferentes Macroclase IDs.





• Algoritmo de clasificación

Las firmas espectrales (características espectrales) de las clases de cobertura de referencia son calculadas considerando los valores de los pixeles de cada ROI que tengan el mismo Clase ID (o Macroclase ID). Por lo tanto, el algoritmo de clasificación, clasifica la imagen completa comparando las características de cada pixel con las características espectrales de las clases de referencia. SCP implementa los algoritmos de clasificación: Distancia mínima, Máxima probabilidad y Mapeo del ángulo espectral. Se detallará el algoritmo de Máxima probabilidad ya que fue usado en el presente estudio.

a) Máxima Probabilidad

El algoritmo "Máxima Probabilidad" calcula las distribuciones de probabilidad para las clases, relacionado al teorema de Bayes, estimando si un pixel pertenece a una clase de cobertura. En particular, las probabilidades de distribución de las clases son asumidas de la forma de modelos normales multivariados (Richards & Jia, 2006). Para utilizar este algoritmo, se requiere un número lo suficientemente alto de pixeles para cada área de entrenamiento, lo cual permite el cálculo de la matriz de covarianza. La función discriminante, se calcula para cada pixel como:

$$g_k(x) = \ln p(C_k) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_k| - \frac{1}{2} (x - y_k)^{\ell} \Sigma_k^{-1} (x - y_k)$$
(1)

Donde:

- $C_k$  = clase de cobertura k;
- -x = vector de firma espectral de un pixel de la imagen;
- $p(C_k)$  = probabilidad de que la clase correcta sea  $C_k$ ;
- $|\sum k|$  = determinante de la matriz de covarianzas de los datos en la clase  $C_k$ ;
- $\sum_{k=1}^{n} =$  Inversa de la matriz de covarianzas;
- $y_k$  = vector de firma espectral de la clase k.



Figura 8-60 Ejemplo de máxima probabilidad

Adicionalmente, es posible definir un umbral de la función discriminante para excluir de la clasificación los pixeles bajo este valor. Considerando un umbral  $T_i$ , la condición de la clasificación resulta:



$$x \in C_k \iff g_k(x) > g_j(x) \forall k \neq j$$
  
and  
 $g_k(x) > T_i$  (2)

#### 8.6.1.2 Modelos predictivos de cambio de uso de suelo

El análisis y modelamiento del cambio de cobertura de suelo pretende identificar sus causas, su ubicación y el momento en que ocurrieron. Para que un modelo predictivo se transformen en una herramienta útil es necesario que representen de manera eficaz la magnitud de los cambios, la localización de los futuros cambios, y; los patrones espaciales de estos cambios (Brown et al., 2002). Para modelar los patrones espaciales de los cambios Theobald y Hobbs (1998), sintetizan los modelos causales del cambio del uso de cobertura en dos tipos principales: modelos de regresión y modelos basados en la transición espacial. El primer tipo establece relaciones funcionales entre un grupo de variables espaciales predecibles que son utilizadas para predecir la localización de los cambios en el paisaje. Este tipo incluye modelos de regresión logísticas, modelos de precio hedónico y redes neurales artificiales. El segundo tipo de modelo es ejemplificado por una extensión espacio-temporal del modelo de transición de Markov conocido como autómata celular. Ambos tipos de modelos pueden utilizarse para incluir sitios geográficos y variables de situación en los cambios modelados (Brown et al., 2000).

#### 8.6.1.3 Modelos de regresión

Los modelos basados en regresión establecen relaciones entre un amplio rango de variables explicativas/predictivas y los cambios observados de ocupación del suelo, para posteriormente, utilizar dichas variables para estimar la localización de los cambios futuros sobre el paisaje. (Weng, 2002). Generalmente en la modelación en base a regresión se ha hecho uso de aproximaciones lineales, como las regresiones logísticas y no lineales como las redes neuronales, estas últimas serán explicadas con mayor detalle.

#### a) Redes neuronales

Las redes neuronales artificiales (Artificial Neural Network o RNA, por sus siglas en inglés) son sistemas de procesamiento que tratan de reproducir la capacidad que tiene el cerebro humano para reconocer patrones, hacer predicciones o tomar una decisión en base a la experiencia pasada. Así, mientras el cerebro humano confía en la estimulación neuronal, las redes neuronales actúan sobre un conjunto de datos para aprender. Dichas redes destacan por su desempeño en la solución de complejos problemas, donde el reconocimiento de modelos o comportamientos es importante. Una RNA consiste principalmente de una capa de entrada, una o más capas ocultas, y una capa de salida. Cada capa consiste en un número de neuronas. Cada neurona en la capa de entrada acepta una de las variables de entrada y genera un valor de salida a la capa siguiente. De tal manera, las variables de entrada son como señales que pasan a través de las capas de la RNA y, finalmente, generan valores de salida.

La ecuación 3 describe como una neurona en la capa de receptor recibe los valores de las neuronas en la capa de remitente, donde  $I_i^n$ es el valor de entrada de la neurona i-ésima en la capa del emisor y  $I_j^{n+1}$  es la salida generada por la neurona j-ésimo en la capa de receptor.  $W_{ij}$  denota los pesos de los valores de entrada y *b* es un valor añadido al sesgo de la suma de todas las entradas. Hay algunas opciones para la función de transición *f*. La selección de f depende de las características de los datos a ser entrenado. En la capa de entrada, todas las variables deben ser reescalado en el rango entre 0 y 1 para la normalización (Qiang and Lam, 2015).



$$l_{j}^{n+1} = f(\sum_{i=1}^{n} w_{ij}l_{i}^{n} + b_{j})$$



Figura 8-61 Estructura de un RNA de 3 capas

#### 8.6.1.4 Modelos de transición

Los modelos basados en transición espacial asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Estos modelos abarcan, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC).

a) Autómatas celulares

Los autómatas celulares (AC) son un tipo de modelo discreto comúnmente utilizado en la modelización de procesos espacio-temporales. Un autómata celular está caracterizado por los siguientes componentes:

- Una rejilla o cuadriculado (*lattice*) de enteros (conjunto Z) infinitamente extendida, y con dimensión d 2 Z+. Cada celda de la cuadrícula se conoce como célula.
- Cada célula puede tomar un valor en Z a partir de un conjunto \_nito de estados k.
- Cada célula, además, se caracteriza por su vecindad, un conjunto \_nito de células en las cercanías de la misma.
- De acuerdo con esto, se aplica a todas las células de la cuadrícula una función de transición (f) que toma como argumentos los valores de la célula en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendría en la siguiente etapa de tiempo. Esta función f se aplica de forma homogénea a todas las células, por cada paso discreto de tiempo.

Cada AC es inherentemente un modelo espacial, es directamente compatible con los datos de mapa de bits y se puede implementar fácilmente en un SIG. Hoy en día, es ampliamente aplicado en el modelado de los procesos ambientales y ecológicos.

### 8.6.2 Flujograma metodológico

Para la estimación de escenarios de disponibilidad hídrica futura, se ha realizado tres procesos principalmente: la primera parte referida al proceso de clasificación supervisada de tres imágenes Landsat (1988, 2002 y 2016). La segunda, comprende la simulación de la cobertura de uso de suelo



para el horizonte del año 2030 en base a redes neuronales y autómata celular. Finalmente, la implementación de la cobertura generada al modelo SWAT (que fue previamente calibrado) es descrita para conocer su nueva distribución en base a los HRU y obtener así los caudales futuros.



Figura 8-62 Flujograma metodológico sobre escenarios de disponibilidad hídrica futura

### 8.6.2.1 Caracterizacion de la cobertura del suelo en las cuencas Ocoña y Camana

Los pasos para la generación de mapas de ocupación y cobertura del suelo de las cuencas de los ríos Ocoña y Majes, para los años 1988, 2002 y 2016 se ha obtenido a través de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat. Además, se detalla la metodología seguida para la generación de un escenario futuro según tendencias de evolución observadas. Se estudian las relaciones entre los cambios y las variables explicativas para modelar luego, estocásticamente, mapas futuros siendo el año horizonte 2030.

• Pre Procesamiento

El pre procesamiento de imágenes de satélite, es el primer paso a realizar debido a una serie de interferencias o de errores (los cuales pueden ser radiométricos, geométricos y/o atmosféricos) durante su recepción, que perturban los datos que quiere analizarse. Se ha mejorado la calidad de la información para las 15 imágenes Landsat descargadas correspondientes a la época seca (comprendidas entre los meses de Mayo a Noviembre y con una cobertura nubosa no mayor a 5%), no fue considerado una corrección geométrica a las imágenes utilizadas debido a que las imágenes ya vienen con un nivel de procesamiento L1T (*Precision Terrain Corrected*), lo que significa que se les ha realizado una corrección geométrica usando puntos de control sobre el terreno.

Como primer paso es necesario convertir los valores de **Radiancia** a **Radiancia espectral en el sensor**, la cual se calcula mediante:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cnl} + A_L \tag{4}$$

Donde:

-  $M_L$  = Factor multiplicativo de re escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos de la imagen Landsat.



- Az = Factor aditivo de re escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos de la imagen Landsat.
- $-Q_{cal}$  = Valores de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (valores digitales DN)

Luego se calculó la **reflectancia al tope de la atmósfera TOA** (indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada). Esta puede ser calculada como:

$$\rho_{p} = (\pi * L_{\lambda} * d^{2}) / (ESUN_{\lambda} * \cos\theta_{\star})$$
<sup>(5)</sup>

Donde:

- L<sub>2</sub> = Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite)
   d' = Distancia Tierra-Sol en Unidades Astronómicas (la cual se encuentra en el archivo de metadatos de las imágenes Landsat 7)
- ESUNa = Irradiancia Media Solar exo-atmosférica
- $\theta s$  = Angulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a:  $\theta s$  = 90°  $\theta e$  donde  $\theta e$  es la elevación solar

Finalmente se corrige los valores de reflectancia mediante el método de sustracción de objeto oscuro (DOS), que asume que las áreas en una imagen de valores conocidos nulos de reflectancia (para el estudio se consideraron las lagunas profundas) deben presentar también valores nulos en la imagen satelital y de no cumplirse, la reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión (scatering) atmosférica, con estos valores y procedimientos aditivos se procede a calibrar el resto de la imagen.

• Clasificacin de imágenes satelitales

imagen clasificación de referencia la tarea de La hace а extraer clases de información de una imagen ráster multibanda. Se emplearon 2 composiciones de bandas RGB 321 y RGB 452 para Landsat 5 y 7; y RGB 432 y RGB 543 para Landsat 8 con el fin de poder diferenciar entre cobertura de agua, nieve, vegetación y suelo, para esta tarea también se apoyó en la utilización realces espectrales, con el fin de definir mejor el contraste entre de las mismas.

Las imágenes Landast fueron descargados del servidor Glovis [Disponible en: https://glovis.usgs.gov/], y tuvo como filtro las imágenes con cobertura nubosa menor al 10%, esto con la finalidad de obtener las imágenes que permitan una mejor visualización de la cobertura vegetal y uso de suelo actual para la posterior clasificación.





#### Figura 8-63 Coberturas identificadas para el ámbito de estudio. Clasificación supervisada de la imagen Landsat 7 del año 2002

Las clases fueron determinadas mediante el uso de áreas de entrenamiento (ROIs) y a partir del algoritmo de clasificación de Máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Classification o MLC, por sus siglas en inglés), identificándose seis clases: Cuerpos de agua, cobertura nival, pastos, barbecho, suelo desnudo-zonas urbanas, y cultivos.

### 8.6.2.2 Prediccion de escenarios de cobertura suelo en las cuencas Ocoña y Camana

El primer paso para la predicción de escenarios futuros de ocupación de suelo es cuantificar los cambios ocurridos en el pasado, para esta tarea se utilizan los mapas de cobertura del suelo de los años 1988, 2002 y 2016 previamente obtenidos, no obstante, se consideró invariantes las clases correspondientes a cuerpos de agua y cobertura nival debido a que sus procesos de cambio ocurren a otra escala de tiempo y debido a procesos físicos distintos Los cambios ocurridos entre 1988 y 2002 para las clases restantes pueden apreciarse en la Tabla 8-1.

En la Tabla 8-2 apreciamos la tabulación cruzada entre las clases identificadas para las fechas 1988 y 2002, la diagonal principal representa las zonas en las que se presentó persistencia de la situación inicial; los valores restantes de la matriz, fuera de la diagonal principal, representan los cambios ocurridos.



# Tabla 8-1. Cambios en la cobertura de suelo 1988-2002

Clases	1988 (Km²)	2002 (Km²)	$\Delta$ (Km²)	1988 %	2002 %	$\Delta$ %
Barbecho	1608.45	3900.15	2291.7	4.85	11.76	6.91
Pastos	22704.66	15203.71	-7500.94	68.49	45.86	-22.63
Suelo desnudo – Zonas urbanas	7985.83	13137.82	5151.99	24.09	39.63	15.54
Cultivos	351.23	408.8	57.56	1.06	1.23	0.17

### Tabla 8-2. Tabulacion cruzada entre el uso de suelo para los años 1988-2002

%	Barbecho	Pastos	Suelo desnudo – Zonas urbanas	Cultivos
Barbecho	68	21	8	0.7
Pastos	12.2	64	23	0.2
Suelo desnudo – Zonas urbanas	0.1	2.5	94	2.2
Cultivos	2.2	6.7	44	46

Una vez cuantificados los cambios entre los dos años analizados (1988 y 2002), cada uno de ellos fue considerado como un submodelo independiente de transición ya que lo más probable es que cada cambio ocurrido obedezca a factores particulares, diferentes según el caso y estos serán modelados en función a variables explicativas mediante una RNA. Si analizamos también los cambios ocurridos para las fechas 2002 y 2016 se observa que se obedecen las mismas tendencias de cambio para las coberturas de barbecho y cultivos que se observaron para los años 1988 y 2001. Por otro lado, las coberturas de pastos (suelo desnudo-zonas urbanas) presentan aumento (disminución) de su superficie. Véase las Tablas 8-3 y 8-4.

### Tabla 8-3. Resumen de cambios observados 2002-2016

Clases	2002 (Km²)	2016 (Km²)	$\Delta$ (Km <sup>2</sup> )	2002 %	2016 %	$\Delta$ %
Barbecho	3900.11	5826.21	1926.1	11.77	17.58	5.81
Pastos	15202.7	16484.1	1281.36	45.86	49.73	3.87
Suelo desnudo – Zonas urbanas	13136.15	9811.51	-3324.64	39.63	29.6	-10
Cultivos	408.72	429.46	20.74	1.23	1.3	0.06

#### Tabla 8-4. Tabulacion cruzada entre el uso de suelo para los años 2002-2016

%	Barbecho Pastos		Suelo desnudo – Zonas urbanas	Cultivos
Barbecho	55.74	40.8	2.77	0.066
Pastos	18.81	75.97	4.53	0.177
Suelo desnudo – Zonas urbanas	5.34	24.86	66.68	1.07
Cultivos	7.79	9.4	17.43	63.6



### 8.6.2.3 Variables explicativas

Las variables explicativas son las encargadas de explicar los cambios de uso de suelo, debemos tener presente que los cambios de cobertura del suelo son el resultado de la interacción de múltiples factores que varían en el tiempo y el espacio según especificas condiciones humanas y medioambientales, en las que los condicionantes biofísicas son tan importantes como los condicionantes antrópicas (Lambin et al., 2003). El éxito del modelo dependerá del potencial de las variables elegidas para explicar la ubicación de los nuevos usos. Obviamente, las variables explicativas más apropiadas variarán en función de la categoría del tipo de cambio de uso de suelo que se quiere modelar y de la región modelada. Para el presente estudio se platearon cinco variables explicativas:

- La precipitación total anual que condiciona la proliferación de especies vegetativas transitorias.
- La elevación (DEM), que define la frontera agrícola.
- La distancia a cursos de agua (ríos y lagos)



Figura 8-64. Variables explicativas consideradas para el presente estudio. Para las figuras c), d) y e) los colores más oscuros representan distancias más cercanas hacia las variables consideradas.

### 8.6.2.4 Entrenamiento de la red neuronal y simulación mediante autómata celulares

Se utiliza una RNA de perceptrón multicapa, cuyos datos de entrada son el ráster de cambio de uso de suelo entre 1988-2002 y las variables explicativas descritas, los pesos que se le dará a cada neurona, durante la fase de entrenamiento, se calculan mediante el algoritmo *back propagation* (BP), que selecciona aleatoriamente los pesos iniciales y luego compara las salidas calculadas con los resultados esperados (transiciones observadas). La diferencia entre los valores observados y calculados es cuantificada mediante el error cuadrático medio (RMSE), el mismo que luego es distribuido a todos los nodos de la red, calculándose nuevamente los pesos de cada nodo. Este proceso es repetido muchas veces hasta que el error se estabiliza en su nivel más bajo.



Utilizando las mismas variables explicativas y el modelo RNA ya entrenado, se puede calcular la probabilidad de que una celda cambie o persista en una de las clases analizadas mediante reglas de transición impuestas por un autómata celular. Se simularon 2 escenarios uno para el año 2016 y para el horizonte del año 2030.

El mapa simulado para el 2016 fue comparado con el mapa generado de la clasificación de la imagen Landsat presentándose una confiabilidad total del 68.2 %, un índice Kappa de 0.5, estos resultados demuestran una buena confiabilidad de los escenarios generados. Debe tenerse en cuenta que el escenario de cobertura de suelo para el año 2030 debe tratarse como un caso hipotético que ocurrirá si se siguen manteniendo los mismos patrones de cambio.



Figura 8-65. Uso de suelo simulado para el horizonte del año 2030.

Clases	2016 (Km²)	2030 (Km²)	∆ (Km²)	2016 %	2030 %	$\Delta$ %
Barbecho	5826.6	4861.17	-956.43	17.58	14.66	-2.91
Pastos	16484.9	18880.8	2395.84	49.73	56.95	7.23
Suelo desnudo – Zonas urbanas	9812.54	8434.18	-1378.36	29.6	25.44	-4.16
Cultivos	429.48	421.35	-8.13	1.29	1.27	-0.025

### Tabla 8-5. Resumen de los cambios observados 2016-2030

### 8.6.2.5 Implementacion del modelo hidrológico SWAT

La cobertura de uso de suelo generada se inserta al modelo SWAT calibrado. De esta manera una nueva distribución de los uso de suelo identificados es establecido para las cuencas de Ocoña y Camaná Majes (Tabla 8-6). Esto genera una nueva cantidad de HRUs, siendo para la cuenca de Ocoña (Camaná Majes) un total de 373 (512).



Tabla 8-6. Características de la cuenca Ocoña reclasificado de acuerdo a la superposición y combinación única de un tipo particular del uso de suelo, tipo de suelos y pendientes con cobertura no menor al 5 % en cada subcuenca. En base al uso de suelo simulado para el horizonte del año 2030.

Parámetro/Código	Descripción	Área [km²]	% del área de la cuenca
Cuenca	Área de la cuenca del río Ocoña	1715275.74	100
Uso de suelo:			
PAST	Pajonales/Pastos	998224.53	62.39
FRST	Barbecho/ Bosques y matorrales	172789.52	10.80
AGRL	Agricultura/Cultivos	11562.61	0.72
WATR	Cuerpos de agua	7819.88	0.49
BARR	Árido	409679.38	25.60
Tipo de suelo:			
GLACIER	Glaciares	108930.04	6.81
I-Bh-Tv-c		35325.27	2.21
I-Re-c		18804.25	1.18
I-Tv-c		1339004.49	83.68
Je7-3a		2848.42	0.18
Tv4-a		4959.07	0.31
Tv6-b		90204.36	5.64
Pendiente (%):			
0-10		378815.52	23.67
10-20		358723.57	22.42
20-30		244641.53	15.29
30-45		232255.01	14.52
>45		385640.27	24.10



Tabla 8-7. Características de la cuenca Camaná Majes reclasificado de acuerdo a la superposición y combinación única de un tipo particular del uso de suelo, tipo de suelos y pendientes con cobertura no menor al 5 % en cada sub-cuenca. En base al uso de suelo simulado para el horizonte del año 2030.

Parámetro/Código	Descripción	Área [km <sup>2</sup> ]	% del área de la cuenca
Cuenca	Área de la cuenca del río Camana	1715275.74	100
Uso de suelo:			
PAST	Pajonales/Pastos	916332.55	53.42
FRST	Barbecho/ Bosques y matorrales	319249.60	18.61
AGRL	Agricultura/Cultivos	29883.32	1.74
WATR	Cuerpos de agua	8063.84	0.47
BARR	Árido	441746.41	25.75
Tipo de suelo:			
GLACIER	Glaciares	142991.03	8.34
I-Bh-Tv-c		44731.09	2.61
I-c		203.54	0.01
I-Re-c		37213.36	2.17
I-Tv-c		1130424.64	65.90
Je7-3a		84645.24	4.93
Tv4-a		170425.30	9.94
Tv6-b		104641.51	6.10
Pendiente (%):			
0-10		471975.35	27.52
10-20		418906.34	24.42
20-30		272979.05	15.91
30-45		241793.48	14.10
>45		309621.50	18.05

Otro factor a considerar son los datos climáticos futuros generados para las variables de precipitación y temperatura máxima y mínima en el período 2011–2065

### 8.6.3 Simulacion para el escenario futuro Periodo 2011-2065 cuenca del río Ocoña

El análisis que se presenta a continuación es para determinar los caudales medios diarios futuros considerando en el periodo 2011-2065 a partir de la precipitación acumulada diaria insertada al modelo SWAT calibrado previamente. Nótese que por la escala de tiempo que se ha trabajado, un análisis a nivel mensual o anual es posible de llevar a cabo. En base a ello, para la cuenca Ocoña se obtuvieron veinte series de caudales mensuales correspondiente a cada subcuenca considerada (Figura 8). Los aportes mínimos registrados están en el rango de 0-13 m<sup>3</sup>/s y las máximas descargas presentan picos de hasta 470 m<sup>3</sup>/s.





Figura 8-66. Serie de tiempo de caudales medios mensuales para las subcuencas del río Ocoña. Periodo 2011-2065.

• Balance hídrico futuro para la cuenca del rio Ocoña

Como una primera visualización del comportamiento hídrico de la cuenca del río Ocoña se adjunta la Figura 9 esta estimación se hizo en base al periodo de análisis 2011-2065.





Figura 8-67. Evolución temporal promedio diario para la cuenca de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.

La distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca se presenta en el Anexo 8-1.



Tabla 8-8. Promeido anual del balance hídrico (presente 1981-2010 y futuro 2011-2065) en la cuenca del rio Ocoña

Componentes del balance hídrico anual	Periodo 1981-2010	Periodo 2011- 2065	Δ%
Aportes y pérdidas del sistema			
Precipitación (R) [mm]	440.9	407.86	-7.49
Evapotranspiración actual (ET) [mm]	179.9	186.08	3.44
Evapotranspiración potencial (ETP) [mm]	1051.6	993.5	-5.52
Rendimiento en la salida de la cuenca			
Rendimiento hídrico (WYLD=Qsup+Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	224.77	202.19	-10.05
Contribución de escorrentía superficial (Q <sub>sup</sub> ) [mm]	38.26	11.66	-69.52
Contribución de flujo base (FB=Q <sub>lat</sub> +Q <sub>gws</sub> +Q <sub>gwd</sub> ) [mm]	186.5	190.53	2.16
Flujo Lateral (Q <sub>lat</sub> ) [mm]	64.44	52.57	-18.42
Flujo de retorno desde el acuífero superficial (Q <sub>gws</sub> ) [mm]	28.20	42.57	50.96
Flujo de retorno desde el acuífero profundo (Q <sub>gwd</sub> ) [mm]	93.86	95.39	1.63

Una disminución de 69.52% se observa para la escorrentía superficial en el periodo 2011-2065, sin embargo la contribución del flujo base (2.16%) aumenta ligeramente. La disponibilidad hídrica analizada por quinquenios a nivel de cada subcuenca da un mejor detalle de la variación de los caudales mensuales en comparación con el presente histórico (1981-2010). Para más detalle ver Anexo 8-2.

En cuanto a la caracterización del potencial del rendimiento hídrico de la cuenca en la Figura 10 se muestra la distribución espacial del rendimiento hídrico promedio anual (periodo 2011-2065) y sus componentes en porcentaje de contribución de la escorrentía superficial y el flujo base. Donde se puede apreciar que las sub-cuencas ubicadas a la salida de la cuenca tienen rendimientos más bajos (0 - 50 mm/año) debido que esta parte de la cuenca experimenta bajas tasas de precipitación propias de las costas de las cuencas de la vertiente del Pacífico. Mientras tanto la partes media y alta de la cuenca se presentan rendimientos más altos (150 - 500 mm/año). La mayor contribución al rendimiento hídrico está dado por el flujo base (90%). Cabe resaltar que el aporte de la escorrentía superficial es notoriamente menor que el aporte del flujo base, siendo la subcuenca ubicada en la salida de la cuenca la que mayor contribución ofrece (40-45%)







Por otro parte, el comportamiento multianual por cada mes indica que hay una fuerte estacionalidad de los caudales. El periodo de mayor contribución hídrica se da entre los meses de Febrero y Marzo.

El periodo de más baja contribución se da en los meses de Octubre y Noviembre. Este comportamiento no es homogéneo para todas las subcuencas (Figura 8-25) en donde la distribución de los caudales varía notoriamente. Algunas subcuencas tienen mayor aporte por una mayor cantidad de tiempo, mientras que en otras tienen altas diferencias en los aportes durante los periodos de avenida (Enero-Abril) y estiaje (Mayo-Diciembre).





Figura 8-69 Representación de los caudales medios mensuales. En la parte superior, los caudales medios para cada subcuenca. En la parte inferior, los caudales medios para toda la cuenca del río Ocoña. Período de evaluación 2011-2065

Los resumenes de los caudales medios mensuales (período 2011-2065) para cada subcuenca se encuentran en el Anexo 8-3.



Tabla 8-9. Resumen de la Precipitación (R), Evapotranspiración real (ET), Rendimiento hídrico (WYLD), Contribución del flujo base (FB), Flujo superficial ( $Q_{sup}$ ), Flujo lateral ( $Q_{lat}$ ), Flujo del acuífero superficial ( $Q_{gws}$ ) y Flujo del acuífero profundo ( $Q_{gwd}$ ) para cada subcuenca del modelo SWAT en la cuenca del río Ocoña. Los valores presentados corresponden a los promedios multianuales del periodo 2011-2065.

Rendimiento hídrico	R [mm]	ET [mm]	WYLD [mm]	Q <sub>sup</sub> [mm]	FB [mm]	Q <sub>lat</sub> [mm]	Q <sub>gws</sub> [mm]	Q <sub>gwd</sub> [mm]
Subcuenca 1	682.39	234.08	417.36	13.27	404.09	59.25	121.24	223.61
Subcuenca 2	615.48	239.42	332.34	3.24	329.11	148.42	51.79	128.89
Subcuenca 3	711.27	233.12	464.86	33.95	430.91	100.22	118.73	211.96
Subcuenca 4	614.66	244.94	326.53	5.06	321.47	50.28	88.55	182.64
Subcuenca 5	710.54	220.59	495.67	58.00	437.67	168.79	93.08	175.80
Subcuenca 6	654.41	225.02	381.42	33.88	347.53	85.09	89.33	173.11
Subcuenca 7	635.80	244.78	364.59	22.96	341.64	68.84	94.66	178.15
Subcuenca 8	560.10	252.10	223.69	2.94	220.75	42.79	48.30	129.65
Subcuenca 9	535.14	243.96	248.25	3.52	244.73	89.00	40.60	115.13
Subcuenca 10	575.19	259.38	284.43	22.84	261.59	34.89	76.91	149.80
Subcuenca 11	240.94	212.80	85.80	0.62	85.17	10.24	2.48	72.46
Subcuenca 12	214.80	151.02	53.18	1.66	51.52	36.27	0.00	15.25
Subcuenca 13	393.14	217.33	141.29	7.43	133.86	66.92	8.40	58.54
Subcuenca 14	392.60	221.70	140.67	7.80	132.86	43.94	17.41	71.52
Subcuenca 15	156.45	135.79	16.34	0.35	15.99	9.99	0.00	6.00
Subcuenca 16	92.87	84.93	7.22	0.11	7.11	6.25	0.00	0.86
Subcuenca 17	101.50	89.13	10.49	1.98	8.51	6.09	0.00	2.42
Subcuenca 18	88.84	68.33	17.37	4.98	12.39	8.54	0.00	3.85
Subcuenca 19	89.92	74.76	13.39	1.31	12.08	9.86	0.00	2.23
Subcuenca 20	91.23	68.44	18.93	7.28	11.65	5.67	0.00	5.98





Figura 8-70. Resumen de los caudales medios multianuales 2011-2065 para cada subcuenca del río Ocoña

### 8.6.4 Simulación para el escenario futuro periodo 2011-2065 cuenca del rio Camana

El análisis que se presenta a continuación es para determinar los caudales medios diarios futuros considerando en el periodo 2011-2065 a partir de la precipitación acumulada diaria insertada al modelo SWAT calibrado previamente. Nótese que por la escala de tiempo que se ha trabajado, un análisis a nivel mensual o anual es posible de llevar a cabo. En base a ello, para la cuenca Camaná Majes se obtuvieron 27 series de caudales mensuales correspondiente a cada subcuenca considerada (Figura 8-69). Los aportes mínimos registrados están en el rango de 0-15 m<sup>3</sup>/s y las máximas descargas presentan picos de hasta 350 m<sup>3</sup>/s.





Figura 8-71. Serie de tiempo de caudales medios mensuales para las subcuencas del río Camaná Majes. Periodo 2011-2065

• Balance Hidrico para la cuenca del rio Camana Majes

Como una primera visualización del comportamiento hídrico de la cuenca del río Camaná Majes se adjunta la Figura 8-28 esta estimación se hizo en base al periodo de análisis 2011-2065.





Figura 8-72. Evolución temporal promedio diario para la cuenca de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.

La distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca se presenta en el Anexo 8-4.



Tabla 8-10. Promedio anual del balance hídrico (presente 1981-2010 y futuro 2011-2065) de la cuenca del río Camaná Majes.

Componentes del balance hídrico anual	Periodo 1981-2010	Periodo 2011-2065	Δ%
Aportes y pérdidas del sistema			
Precipitación (R) [mm]	356.3	444.9	24.87
Evapotranspiración actual (ET) [mm]	201.8	229.22	13.59
Evapotranspiración potencial (ETP) [mm]	1254.5	1009.1	-19.56
Rendimiento en la salida de la cuenca			
Rendimiento hídrico (WYLD=Qsup+Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	127.12	230.25	81.13
Contribución de escorrentía superficial (Q <sub>sup</sub> ) [mm]	18.82	4.77	-74.65
Contribución de flujo base (FB=Q <sub>lat</sub> +Q <sub>gws</sub> +Q <sub>gwd</sub> ) [mm]	108.3	225.48	108.20
Flujo Lateral (Q <sub>lat</sub> ) [mm]	39.99	32.88	-17.78
Flujo de retorno desde el acuífero superficial (Q <sub>gws</sub> ) [mm]	10.94	75.81	592.96
Flujo de retorno desde el acuífero profundo (Q <sub>gwd</sub> ) [mm]	57.37	116.79	103.57

Una disminución de 74.65% se observa para la escorrentía superficial en el periodo 2011-2065, sin embargo la contribución del flujo base (108%) aumenta. La disponibilidad hídrica analizada por quinquenios a nivel de cada subcuenca da un mejor detalle de la variación de los caudales mensuales en comparación con el presente histórico (1981-2010). Para más detalle ver Anexo 5.

En cuanto a la caracterización del potencial del rendimiento hídrico de la cuenca en la Figura 15 se muestra la distribución espacial del rendimiento hídrico promedio anual (periodo 2011-2065) y sus componentes en porcentaje de contribución de la escorrentía superficial y el flujo base. Donde se puede apreciar que las sub-cuencas ubicadas a la salida de la cuenca tienen rendimientos más bajos (0 - 80 mm/año) debido que esta parte de la cuenca experimenta bajas tasas de precipitación propias de las costas de las cuencas de la vertiente del Pacífico. Mientras tanto la partes media y alta de la cuenca se presentan rendimientos más altos (200 - 600 mm/año). La mayor contribución al rendimiento hídrico está dado por el flujo base (96%). Cabe resaltar que el aporte de la escorrentía superficial es notoriamente menor que el aporte del flujo base, siendo la subcuenca ubicada en la salida de la cuenca la que mayor contribución ofrece (80-90%) Esto ocurre debido al aporte de caudal que realiza el reservorio de Condoroma para la irrigación de las pampas de Majes e influye en la caracterización hídrica y tiene mayor implicancia en la parte baja de la cuenca Camaná Majes.





Figura 8-73. Distribución espacial a nivel de HRUs de: a) rendimiento hídrico (WYLD en mm) (Izquierda), b) contribución de flujo base (derecha superior) y c) contribución de la escorrentía superficial (derecha inferior).

Por otro parte, el comportamiento multianual por cada mes indica que hay una estacionalidad bien definida de los caudales. El periodo de mayor contribución hídrica se da entre los meses de Febrero y Marzo. El periodo de más baja contribución se da en los meses de Setiembre y Octubre. Este comportamiento no es homogéneo para todas las subcuencas (Figura 8-72 y 8-73) en donde la distribución de los caudales varía notoriamente. Algunas subcuencas tienen mayor aporte por una mayor cantidad de tiempo, mientras que en otras tienen marcadas diferencias en los aportes durante los periodos de avenida (Enero-Mayo) y estiaje (Junio-Diciembre).





Figura 8-74. Representación de los caudales medios mensuales. Presentación de la subcuenca uno a la dieciocho del modelo SWAT de Camaná Majes. Período de evaluación 2011-2065.





Figura 8-75. Representación de los caudales medios mensuales. En la parte superior, Presentación de la subcuenca diecinueve a la veintisiete del modelo SWAT de Camaná Majes. En la parte inferior, los caudales medios para toda la cuenca del río Camaná Majes. Período de evaluación 2011-2065.

Los caudales medios mensuales (período 2011-2065) para cada subcuenca se encuentran en el Anexo 8-5.


Tabla 8-11. Resumen de la Precipitación (R), Evapotranspiración real (ET), Rendimiento hídrico (WYLD), Contribución del flujo base (FB), Flujo superficial ( $Q_{sup}$ ), Flujo lateral ( $Q_{lat}$ ), Flujo del acuífero superficial ( $Q_{gws}$ ) y Flujo del acuífero profundo ( $Q_{gwd}$ ) para cada subcuenca del modelo SWAT en la cuenca del río Camaná Majes. Corresponden a los promedios multianuales del periodo 2011-2065.

Rendimiento hídrico	R [mm]	ET [mm]	WYLD [mm]	Q <sub>sup</sub> [mm]	FB [mm]	Q <sub>lat</sub> [mm]	Q <sub>gws</sub> [mm]	Q <sub>gwd</sub> [mm]
Subcuenca 1	58.23	52.85	5.40	3.09	2.31	2.09	0.08	0.14
Subcuenca 2	52.73	51.27	1.43	0.76	2.98	0.62	0.02	0.03
Subcuenca 3	114.25	90.38	22.69	16.18	7.19	4.10	0.92	1.51
Subcuenca 4	469.67	628.55	231.69	0.69	237.52	20.10	82.71	128.20
Subcuenca 5	469.23	237.58	227.03	0.45	457.58	9.77	85.03	131.78
Subcuenca 6	525.58	245.85	274.44	1.25	499.77	7.94	104.40	160.85
Subcuenca 7	199.82	172.35	27.22	0.63	299.79	24.82	0.69	1.09
Subcuenca 8	528.21	246.99	275.44	1.08	300.95	18.88	100.29	155.18
Subcuenca 9	99.20	95.97	3.21	0.02	277.54	3.19	0.00	0.00
Subcuenca 10	297.61	259.49	38.95	1.53	40.60	27.86	3.69	5.86
Subcuenca 11	192.12	170.85	21.31	0.43	58.29	18.53	0.91	1.43
Subcuenca 12	572.71	252.27	315.21	1.19	334.90	32.74	110.63	170.66
Subcuenca 13	466.58	241.25	225.90	0.61	539.31	31.32	75.83	118.14
Subcuenca 14	572.61	247.82	318.50	2.24	541.54	34.88	110.67	170.71
Subcuenca 15	427.13	262.34	163.78	3.21	476.82	46.54	44.34	69.69
Subcuenca 16	584.45	292.01	322.00	1.38	481.19	31.17	113.86	175.59
Subcuenca 17	643.45	261.01	375.22	5.91	689.93	21.80	137.14	210.37
Subcuenca 18	603.44	260.15	344.56	1.45	712.42	34.99	121.32	186.81
Subcuenca 19	541.49	258.65	286.88	1.10	628.89	54.84	90.61	140.33
Subcuenca 20	733.73	272.56	488.83	24.95	749.66	112.81	138.76	212.32
Subcuenca 21	708.66	252.97	449.21	20.26	892.83	56.00	147.52	225.43
Subcuenca 22	649.05	277.15	367.02	2.43	793.54	61.19	119.45	183.95
Subcuenca 23	763.12	284.20	472.41	2.27	834.73	52.95	165.30	251.90
Subcuenca 24	736.83	276.66	458.43	3.26	925.32	52.39	159.44	243.34
Subcuenca 25	491.91	203.40	286.16	19.63	721.70	73.05	75.75	117.73
Subcuenca 26	464.13	250.04	211.86	12.77	465.61	51.19	57.53	90.37
Subcuenca 27	46.43	44.39	2.03	0.02	201.10	2.01	0.00	0.00





Figura 8-76. Caudales medios multianuales 2011-2065 para cada subcuenca del río Camaná Majes.

### 8.7 Conclusiones y Recomendaciones

### 8.7.1 Conclusiones

### 8.7.1.1 Sobre escenarios de Precipitacion

En la Región Arequipa, Cuencas Ocoña y Camaná-Majes se proyecta 2036-2065 relativo 1981-2005 bajo el escenario de altas emisiones de GEI un calentamiento promedio de 2°C por encima de su valor normal actual y para un escenario de moderadas emisiones de 1.5°C, que son consistentes con el calentamiento observado a nivel global y que se evidencia también en las tendencias de aumento de la temperatura histórica observada en el periodo 1964-2016 en las localidades de interés, donde existe estación meteorológica en el área de estudio.

Se estima cambios futuros de precipitación 2036-2065 bajo los escenarios de alta y moderada emisión de Gases de Efecto Invernadero, con alta variabilidad principalmente en su distribución temporal; cambios que incorporan una dosis mayor de incertidumbre en relación a la temperatura máxima y mínima proyectada, que son más consistentes y presentan una tendencia gradual de aumento en el futuro.

La precipitación futura indica adelanto del periodo de lluvias en la región Arequipa en SON para luego tender a finalizar en DEF, que se refleja en la reducción importante en el trimestre MAM, principalmente en las zonas medias (1500-3800 msnm) y altoandinas (por encima de los 3800 msnm).



Los cambios futuros de precipitación, son consistente en parte con la tendencia de aumento histórica que viene observándose en el periodo 1964-2016, en las localidades de interés donde existe estación meteorológica dentro del área de estudio.

El rango de incertidumbre de la magnitud de cambios en la precipitación es mayor en la zona costera de la región Arequipa y de las cuencas de estudio, en relación a la zona andina donde es menor.

## 8.7.1.2 Sobre escenarios de SPI

• Cuenca del rio Ocoña

Segun SPI 3, en la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 16/20 subcuenca y se presentó de enero a abril 1999 (4 meses) y el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 17/20 subcuenca y se presento de abril a junio 1982 (3 meses). En la línea base 2017-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 14/20 subcuenca y se presentaria de febrero a abril 2027 (3 meses), y el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 17/20 subcuenca y se presentaria de mayor alcance espacial afectaria y se presentaria de mayor alcance espacial afectaria a 17/20 subcuenca y se presentaria de mayor alcance espacial afectaria a 17/20 subcuenca y se presentaria de mayor a julio 1957 (3 meses).

Segun SPI 12, en general durante la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 20/20 subcuenca y se presentó de mayo a diciembre 1999 (8 meses) y el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 10/20 subcuenca y se presento de abril a setiembre 1982 (6 meses). El periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 10/20 subcuenca y se presento de abril a setiembre 1982 (6 meses). En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 14/20 subcuenca y se presentaria de feb 2044 a enero 2045 (12 meses) y el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 19/20 subcuenca y se presentaria de febrero a noviembre 2054 (10 meses).

• Cuenca del rio Camana

Según el SPI 3, durante la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 20/27 subcuenca y se presentó de noviembre 1998 a mayo 1999 (7 meses) y el periodo húmedo de mayor alcance espacial afectó a 13/27 subcuenca y se presento de enero a marzo 1993 (3 meses). En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 15/27 subcuenca y se presentaria de abril a julio 2056 (4 meses) y el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 23/27 subcuenca y se presentaria de enero a marzo 2054 (3 meses).

Segun SPI 12, en la línea base 1981-2010, el periodo seco de mayor alcance espacial afecto a 26/27 subcuenca y se presentó de marzo a noviembre 1999 (9 meses) y el periodo húmedo de mayor alcance espacial espacial afectó a 14/27 subcuencas se presentó durante abril a diciembre 1993 (9 meses) En la línea base 2011-2065, el periodo seco de mayor alcance espacial afectaria a 17/27 subcuenca y se presentaria de mayo a noviembre 2037 (8 meses) y el período húmedo de mayor alcance espacial afectaria a 22/27 subcuenca y se presentaria de febrero a octubre 2054 (9 meses).

## 8.7.1.3 Sobre escenarios de disponibilidad hídrica período 2011-2065

La estimación del cambio de cobertura para los años 1988, 2002, 2016 y el escenario proyectado hacia el año horizonte 2030, reveló que en líneas generales la persistencia es el estado predominante en todo el ámbito de estudio, no obstante se han producido cambios significativos en las áreas agrícolas debido principalmente al desarrollo urbano que se ha incrementado en los últimos años.



De la comparación del periodo presente (1981-2010) con el futuro (2011-2065) en la cuenca de rio Ocoña, se presenta un ligero menor aporte de la precipitación (7.49%) y una disminución en el rendimiento hídrico (10%). Sin embargo, se estima una significante reducción del aporte de la escorrentía superficial (69.52%) e incremento del aporte del flujo base (2.16%). Los escenarios climáticos y antropogénicos futuros (dado que se consideró el cambio de cobertura en el uso de suelo) tiene mayor incidencia en la menor disponibilidad del aporte de la escorrentía superficial. De la comparación del periodo presente (1981-2010) y futuro (2011-2065) en la cuenca de rio Camaná Majes existe un mayor aporte de la precipitación (24.87%) y un considerable incremento en el rendimiento hídrico (81.13%). Sin embargo, se estima una significante reducción del aporte de la escorrentía superficial (74.65%) y considerable incremento del aporte del flujo base (108.2%). Se puede considerar como una cuenca susceptible al cambio de condiciones climáticas y antropogénicas, dado que se consideró el escenario de cobertura en el uso de suelo.

### 8.7.2 Recomendaciones

La información generadade cambios futuros puede ser usada a escala regional, en grandes cuencas y en algunas localidades de interés donde existe estación meteorológica y donde se ha generado información de escenarios. Sin embargo, cuando se requiera información con mayor detalle espacio-temporal es necesario generar información más fina, que demanda para su modelización mayor costo de tiempo e infraestructura computacional. Para ello se recomienda la incorporación de 5 módulos de procesamiento para el servidor de alto rendimiento adquirido en el 2016 con que cuenta SENAMHI.

Los resultados de este estudio deben ser considerados haciendo mayor énfasis en las tendencias de aumento y/o disminución, antes que en la magnitud de los cambios, ya que la generación de los escenarios climáticos presenta incertidumbre inherente.

Se recomienda la actualización de este estudio con los nuevos escenarios de emisiones que serán publicados el 2021, y en su generación se tome las salidas de los modelos que mejor se aproximen al comportamiento de referencia, restringiendo a aquellos potencialmente limitados para representar plausiblemente el clima futuro de la región sudamericana y nacional.

Promover acciones de monitoreo de deficiencias hídricas en las cuencas Ocoña y Camana, medidas de conservación de suelos para recarga de acuífero, dado su alta capacidad evapotranspirativa.



## **Referencia Bibliográfica**

Brown, D. G., Pijanowski, B. C., and Duh, J. (2000). Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. Journal of Environmental Management, 59(4):247–263.

Brown, D., Goovaerts, P., Burnicki, A., and Li, M. (2002). Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68(10):1051–1061.

Lambin, E. F., Geist, H. J., and Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and landcover change in tropical regions. Annual review of environment and resources, 28(1):205–241.

Qiang, Y. and Lam, N. S. (2015). Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata. Environmental monitoring and assessment, 187(3):1-16.

Richards, J. A. and Jia, X., 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer.

Theobald, D. M. and Hobbs, N. T. (1998). Forecasting rural land-use change: a comparison of regression-and spatial transition-based models. Geographical and Environmental Modelling, 2:65–82.

Weng, Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of environmental management, 64(3):273–284.



Anexo – Capiutlo VIII



# Anexo 8-1. Caudales medios mensuales para cada subcuenca considerada en los modelos SWAT de las cuencas de Ocoña y Camaná Majes.

Tabla 8-12. Resumen de los caudales medios mensuales (período 2011-2065) para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de la cuenca del Río Ocoña.

Subcuencas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
sub1	14.99	36.62	47.91	41.55	26.48	14.83	11.27	8.47	6.50	5.05	4.12	6.48
sub2	16.12	40.00	53.84	47.38	30.24	16.86	12.83	9.65	7.40	5.76	4.64	7.08
sub3	18.45	34.38	35.61	26.69	15.91	9.30	7.14	5.30	4.31	3.58	3.87	8.27
sub4	1.11	3.33	5.88	5.80	3.76	2.02	1.55	1.17	0.89	0.71	0.52	0.59
sub5	36.44	57.14	49.30	30.69	16.84	9.97	8.85	6.12	6.68	5.76	7.01	17.81
sub6	12.30	23.09	23.55	17.24	9.84	5.82	4.62	3.36	2.85	2.32	2.06	5.07
sub7	8.15	17.43	19.16	15.31	9.14	5.41	4.20	3.11	2.58	2.03	1.70	3.23
sub8	4.51	12.08	21.24	22.46	14.70	8.95	6.90	5.14	3.90	2.98	2.22	2.33
sub9	39.50	86.91	104.31	85.72	52.60	29.87	22.85	17.04	13.50	10.75	9.59	17.44
sub10	6.54	19.16	25.20	21.44	13.63	7.71	5.84	4.36	3.48	2.60	1.97	2.50
sub11	0.63	1.59	2.59	3.14	2.68	2.09	1.62	1.21	0.90	0.68	0.50	0.43
sub12	53.82	124.24	154.84	130.56	80.97	46.37	35.31	26.15	20.61	16.12	13.45	22.65
sub13	68.26	120.27	108.47	73.62	41.65	24.88	20.53	14.44	14.35	11.70	11.93	29.11
sub14	7.36	17.49	15.77	13.61	8.13	5.15	3.92	2.95	2.35	2.01	1.52	2.98
sub15	0.39	0.67	0.38	0.16	0.12	0.09	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.08
sub16	0.31	0.36	0.12	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03
sub17	0.28	0.26	0.06	0.04	0.03	0.02	0.04	0.06	0.01	0.05	0.07	0.04
sub18	1.18	1.52	0.55	0.21	0.15	0.11	0.10	0.11	0.03	0.08	0.16	0.17
sub19	132.38	265.62	279.33	216.59	129.39	75.02	58.46	42.25	35.92	28.76	26.33	54.39
sub20	132.37	266.25	277.98	215.39	128.19	73.54	57.00	40.98	34.71	27.71	26.12	53.80
PROMEDIO	27.75	56.42	61.31	48.38	29.22	16.90	13.16	9.60	8.05	6.43	5.89	11.72



Tabla 8-13. Resumen de los caudales medios mensuales (período 2011-2065) para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de la cuenca del Río Camaná Majes.

Subcuencas	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
sub1	95.47	185.20	193.36	155.73	87.89	55.17	38.35	30.09	27.20	23.59	23.85	36.40
sub2	0.20	0.22	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.13
sub3	2.53	0.86	0.30	0.10	0.31	0.06	0.03	0.11	0.18	0.07	2.06	0.55
sub4	1.51	3.98	5.73	5.43	3.90	2.50	1.68	1.20	0.87	0.65	0.49	0.46
sub5	0.26	0.71	1.06	1.01	0.73	0.46	0.31	0.22	0.16	0.12	0.09	0.09
sub6	1.22	3.21	4.59	4.34	3.13	2.01	1.35	0.97	0.70	0.52	0.39	0.37
sub7	0.48	0.70	0.22	0.10	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09
sub8	3.14	7.30	9.89	9.06	6.40	4.05	2.70	1.95	1.41	1.07	0.86	0.98
sub9	93.79	185.03	195.40	158.48	88.82	57.70	40.92	32.22	28.03	25.48	23.26	37.11
sub10	2.21	4.14	1.96	1.33	0.75	0.32	0.19	0.13	0.28	0.12	0.12	0.76
sub11	91.19	180.61	193.63	157.73	88.75	58.23	41.55	32.89	28.31	25.97	23.64	36.49
sub12	9.99	20.48	26.55	23.97	16.94	10.85	7.18	5.18	3.77	2.88	2.33	3.07
sub13	3.32	7.58	9.85	8.45	5.88	3.65	2.48	1.79	1.31	1.00	0.85	1.07
sub14	0.36	0.89	1.15	0.99	0.69	0.44	0.30	0.21	0.16	0.12	0.10	0.11
sub15	43.50	96.20	114.87	99.30	52.41	36.83	27.35	22.97	21.08	18.99	17.63	20.01
sub16	15.81	30.61	38.83	34.38	24.20	15.55	10.27	7.43	5.44	4.24	3.63	5.23
sub17	5.27	9.96	12.56	11.30	8.04	5.23	3.45	2.49	1.81	1.38	1.11	1.61
sub18	12.86	38.24	43.73	39.62	11.48	11.21	10.73	11.11	12.26	12.00	11.56	9.92
sub19	30.92	71.08	83.95	74.24	35.76	27.06	21.04	18.51	17.68	16.26	15.29	15.93
sub20	4.67	6.31	7.07	5.13	3.51	2.31	1.53	1.12	0.87	0.86	1.05	2.24
sub21	4.14	6.34	7.29	6.02	4.21	2.76	1.82	1.32	0.99	0.85	0.88	1.66
sub22	20.06	50.80	58.95	52.82	20.79	17.35	14.73	13.99	14.37	13.65	13.02	12.40
sub23	6.07	10.49	12.75	11.16	7.92	5.27	3.45	2.47	1.82	1.41	1.23	2.13
sub24	7.10	12.91	16.00	14.10	10.03	6.69	4.33	3.11	2.27	1.76	1.49	2.41
sub25	21.53	34.96	33.83	25.00	16.15	10.01	6.83	4.91	3.69	3.49	2.93	8.16
sub26	22.37	44.60	42.87	33.19	21.36	12.71	8.73	6.29	4.67	4.16	3.60	7.64
sub27	93.88	185.07	195.03	157.98	88.34	57.23	40.44	31.76	27.62	25.14	22.96	36.91
PROMEDIO	21.99	44.39	48.57	40.41	22.53	15.02	10.81	8.68	7.67	6.88	6.46	9.03



Anexo 8-2. Distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de Ocoña.



Figura 8-77. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 1 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-78. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 2 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-79. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 3 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-80. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 4 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-81. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 5 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-82. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 6 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-83. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 71 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-84. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 8 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-85. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 9 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-86. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 10 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-87. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 11 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base





Figura 8-88. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 12 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-89. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 13 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-90. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 14 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-91. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 15 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-92. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 16 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-93. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 17 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-94. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 18 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-95. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 19 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-96. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 20 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Anexo 8-3. Distribución promedio diaria de las variables de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base para cada subcuenca considerada en el modelo SWAT de Camaná Majes.



Figura 8-97. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 1 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-98. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 2 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-99. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 3 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-100. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 4 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-101. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 5 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-102. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 6 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-103. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 7 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-104. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 8 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.




Figura 8-105. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 9 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-106. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 10 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-107. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 11 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-108. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 12 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-109. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 13 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-110. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 14 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-111. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 15 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-112. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 16 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-113. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 17 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-114. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 18 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-115. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 19 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-116. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 20 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-117. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 21 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-118. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 22 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-119. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 23 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-120. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 24 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-121. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 25 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.





Figura 8-122. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 26 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Subcuenca 27



Figura 8-123. Evolución temporal promedio diario para la Subcuenca 27 para la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial y contribución de flujo base.



Anexo 8-4. Comparación de los caudales medios mensuales (periodo 1981-2010) con los caudales de los quinquenios futuros (periodo 2011-2065) para la cuenca del rio Ocoña.



Figura 8-124. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 1.



Figura 8-125. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 2.





Figura 8-126. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 3.



Figura 8-127. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 4.









Figura 8-129. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 6.





Figura 8-130. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 7.



Figura 8-131. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 8.





Figura 8-132. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 9



Figura 8-133. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 10.





2005-2040 0.05 0.40 0.29 0.25 0.76 0.55 0.76 1.62 1.02 1.24 0.55 0.71 0.55 2001-2045 1.18 0.89 0.65 0.55 0.75 1.52 1.07 3.78 3.47 2.72 2.11 1.59 1.85 2046-2050 0.85 0.66 0.47 0.36 0.57 1.48 2.46 3.11 2.00 1.84 1.53 1.15 1.44 2051-2655 1.06 0.70 0.29 0.55 0.79 1.52 3.31 4.14 3.24 2.47 1.91 1.43 1.54 2056-2665 1.06 0.70 0.29 0.56 0.79 1.52 3.31 4.14 3.24 2.41 1.53 1.17 0.87 1.13 2056-2665 0.66 0.60 0.37 0.34 0.53 1.21 1.84 2.06 1.87 1.53 1.19 0.68 1.06 1991-2010 0.97 0.73 0.54 0.47 1.04 3.35 3.77 3.10 2.73 2.24 1.74 1.50 1.85





Figura 8-135. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 12.





Figura 8-136. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 13.



Figura 8-137. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 14.









Figura 8-139. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 16.





Figura 8-140. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 17.



Figura 8-141. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 18.





Figura 8-142. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 19.



Figura 8-143. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 20.



Anexo 8-5. Comparación de los caudales medios mensuales (periodo 1981-2010) con los caudales de los quinquenios futuros (periodo 2011-2065) para la cuenca del rio Camaná Majes.



Figura 8-144. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 1.



Figura 8-145. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 2.





Figura 8-146. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 3.



Figura 8-147. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 4.





Figura 8-148. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 5.



Figura 8-149. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 6.





Figura 8-150. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 7.



Figura 8-151. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 8.





Figura 8-152. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 9.



Figura 8-153. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 10.





Figura 8-154. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 11.



Figura 8-155. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 12.





2051-2055 1.46 1.00 0.97 1.17 3.83 9.08 11.31 9.51 8.59 4.04 2.74 1.99 4.49 2056-2056 1.36 1.02 6.83 1.08 4.48 5.43 10.23 8.79 6.08 3.74 2.54 1.85 4.20

2061-2065 1.34 1.01 0.87 1.20 3.24 7.60 10.00 0.70 6.06 3.69 2.51 1.82 4.00 1981-2010 1.41 1.08 1.01 1.64 115 8.94 10.50 8.92 6.24 4.22 2.65 1.06 4.50

Figura 8-156. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 13.



Figura 8-157. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 14.




Figura 8-158. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 15.



Figura 8-159. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 16.





Figura 8-160. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 17.



Figura 8-161. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 18.





Figura 8-162. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 19.



Figura 8-163. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 20.





Figura 8-164. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 21.



Figura 8-165. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 22.





Figura 8-166. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 23.



Figura 8-167. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 24.





Figura 8-168. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 25.



Figura 8-169. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 26.





Figura 8-170. Quinquenios comparados respecto a los caudales de 1981-2010 para la subcuenca 27.