

Impactos del Cambio Climático en la Hidrología y en los Recursos Hídricos

José Rodolfo Valles León

Dirección Observatorio Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

San Salvador, El Salvador

jvalles@marn.gob.sv

Abstract – En este documento de investigación se realiza un análisis de los impactos del Cambio Climático en una cuenca hidrográfica importante de El Salvador. Estos impactos fueron evaluados en base a las simulaciones de los escenarios contemplados en la quinta parte del proyecto de interoperación de las simulaciones de los escenarios de Cambio Climático CMIP5 (Coupled Modelling Inter Comparison Project 5). Entre los análisis de impacto que se realizan se destacan los cambios en la precipitación, aportaciones y evapotranspiración promedio mensuales para tres periodos de tiempo a futuro: 2011 – 2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2100. De igual forma, se cuantifica el impacto en la intensidad y duración de las sequías en base a los resultados de las simulaciones hidrológicas para el periodo 2011 – 2100. Los resultados de las simulaciones multimodelo para cada uno de los nuevos escenarios de emisión, denominadas Caminos de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en ingles), muestran cambio significativos en las aportaciones mensuales promedios. Por ejemplo, los meses de época seca se observa una disminución de los aportes hídricos en la cuenca de estudio. Los mayores cambios en las aportaciones mensuales se observan en el periodo 2071 – 2100, en donde se podrían tener una disminución cercana al 50%. Por otra parte, la variable precipitación en la cuenca de estudio mostraría una reducción considerable de precipitación promedio, principalmente para el escenario RCP 8.5. Asimismo, se estima un incremento en la tendencia de la evapotranspiración al final del siglo y para cada uno de los escenarios de emisión. Lo anterior describe los impactos del cambio climático al ciclo hidrológico, ya que se tendría un menor porcentaje disponible del recurso hídrico en la superficie y una mayor cantidad de agua en la atmosfera. Por otra parte, el análisis de los índice de sequía mostraron un incremento en la intensidad y duración de las sequias hidrológica al finales del siglo usando los resultados multimodelo del escenario pesimista o RCP 8.5.

I. INTRODUCCIÓN

El clima global influencia en la tierra a través de cambio de temperatura, patrones de precipitación, derretimiento de

nieve, entre otros fenómenos. Estos cambios pueden deberse a procesos internos, factores externos o a cambios en la composición de la atmosfera como producto de factores antropogénicos. Estos cambios tiene un impacto directo en el ciclo hidrológico, debido a que produce cambios en los caudales, evapotranspiración, temperatura y precipitaciones. Los Modelos Climáticos Globales (MCG) han sido desarrollados con el fin de evaluar estos impactos a futuro, usando diferentes escenarios de emisión de gases que produce el cambio climático. Estos modelos son regionalizados para una zona de interés por medio de técnicas de reducción de escala o “downscaling”, el cual permite tener una mejor reproducción de los procesos atmosféricos que ocurren en escala menor. Posteriormente, estos modelos se ocupan para forzar los modelos hidrológicos y realizar estimaciones de los impactos del Cambio Climático a futuro en la hidrología de una cuenca. El objetivo de este estudio es evaluar los impactos del cambio climático en una cuenca hidrográfica importante de El Salvador, en base a las simulaciones de los escenarios de cambio climático del proyecto CMIP5 (Coupled Modelling Inter Comparison Project 5). La primera parte del documento está basado en conceptos y generalidades de Cambio Climático y las incertidumbres que tienen los modelos de escenarios. Posteriormente, se define los índices de sequía hidrológica, el cual servirá para interpretar las proyecciones a futuro de los escenarios de emisión de gases. A continuación, se definirá el caso de estudio y la línea de referencia para evaluar los impactos de cambio climático. Finalmente, se presentan los resultados y se presentan las conclusiones de este estudio.

II. CAMBIO CLIMÁTICO

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define al clima como el estado promedio del tiempo en un lugar y durante un periodo determinado. El clima influencia a la tierra a través de cambios en temperatura, precipitación, cobertura nieve, evapotranspiración, etc., los cuales tienen un impacto socioeconómico en la humanidad. El clima es un sistema de interacción compleja, el cual incluye la atmosfera, troposfera, océanos y otros cuerpos de agua. De forma similar, el clima es un sistema que evoluciona en el tiempo bajo la influencia de sus propias dinámicas internas

y debido a los cambios en factores externos que afectan el clima, tales como variaciones solares, erupciones volcánicas y cambios producidos por la humanidad. [1]

La radiación solar aumenta el sistema climático, el cual puede alterar su balance en base a las siguientes formas descritas [2]

- Cambiando la radiación solar que llega a la tierra; es decir, cambios en la órbita de la tierra.
- Cambiando la fracción de radiación solar que es reflejado o el albedo. Por ejemplo, por cambios en la cobertura de nubes, partículas atmosféricas o vegetación
- Alterando las concentraciones de gases de efecto invernadero o radiaciones infrarrojas desde la tierra al espacio.

Cambio Climático se refiere a una variación estadística significativa en el estado medio del clima o en su variabilidad, el cual persiste por un periodo extendido en el tiempo y podría deberse a procesos internos, factores externos o cambios en la composición de la atmosfera como productos de factores antropogénicos. Adicionalmente, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) definió Cambio Climático como un cambio en el clima, atribuido indirecta o directamente a la actividad humana, el cual altera la composición de la atmosfera. Entre las dos definiciones presentadas anteriormente, se puede observar que la definición brindada por la UNFCCC atribuye los cambios climáticos a la actividad humana de forma directa o indirectamente. Otra definición brindada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), menciona que Cambio Climático es cualquier cambio en el clima en una escala de tiempo prolongada, debido a una variación natural o como resultado de la actividad humana. [3]

Cambio Climático y el ciclo hidrológico están indudablemente unidos. Cambios en la temperatura, patrones en las precipitaciones y tasas de evapotranspiración, afectan los caudales en los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos. De acuerdo a los reportes de la IPCC [3], la temperatura global ha aumentado las tasas de evapotranspiración y la capacidad de humedad en los suelos; estos cambios producen una notable reducción en los recursos hídricos, produciendo sequías prolongadas y más recurrentes. De forma similar, el Cambio Climático podría producir impactos severos en inundaciones, aumentando la recurrencia de los mismos.

Modelos Climáticos Globales (MCG) han sido desarrollados en la última década con el fin de estudiar las interacciones entre las capas del sistema climático mediante la resolución de ecuaciones de las leyes y principio de la física que gobiernan los procesos de cada componente del sistema y los intercambios de energía entre sí [4]. En estos días, estos

modelos son capaces de capturar las características espacio-temporal del clima. Sin embargo, la complejidad del sistema esta evidenciada en el uso de muchas ecuaciones termodinámicas, químicas, biológicas. [5].

Fig. 1 muestra la configuración tridimensional de un Modelo Climático Global en donde en cada grilla es calculado variables del modelo (energía, presión) a cada paso de tiempo. Para escenarios de cambio climático se corre modelos con 100 años de simulaciones en un orden semanal o mensual. Usualmente, los modeladores incrementan las concentraciones de gases de efecto invernadero y observan los efectos producido por este cambio.

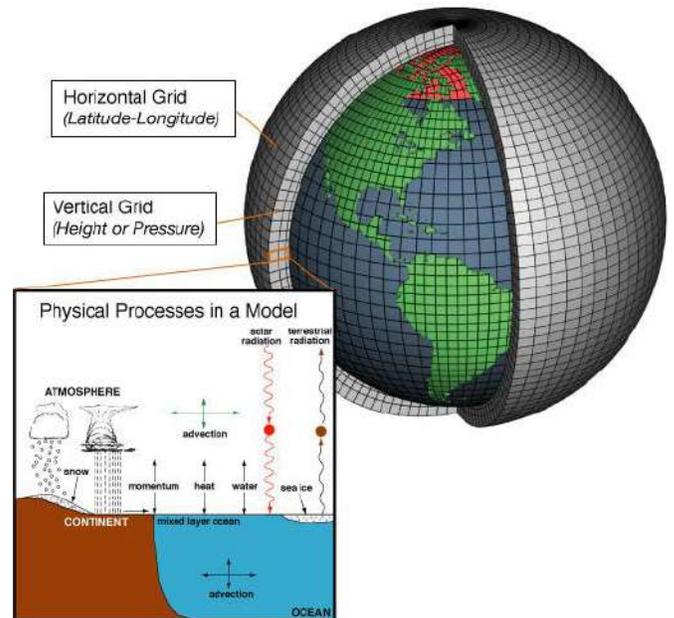


Fig. 1. Estructura típica de un Modelo de Circulación Global. [6]

Los MCG tienen una resolución muy gruesa, lo cual hace que muestren ineficiencias en escalas espaciales menores. Por lo tanto, los vuelve inapropiados para evaluar impactos en un área específica [7]. Para resolver esta limitante, técnicas de reducción de escala (referido en inglés como Downscaling) es aplicado con el fin de evaluar impactos de cambio climático en áreas de interés. Entre los métodos de reducción se destacan las herramientas dinámicas y estadísticas. [8]. La reducción de escala dinámica considera características de superficie general aplicando Modelos Climáticos Regionales (MCR) a las salidas de los MCG, lo cual permite capturar procesos locales. Sin embargo, estos modelos regionales son sumamente costoso de operar [9]. Por otro lado, reducción de escala estadística encuentra la relación estadística entre las características climáticas en escala larga (predictor) y la climatología local (predictante) a través de una función de transferencia. La reducción de Escala Estadística es computacionalmente rápido y por lo tanto puede ser ocupado en las salidas de los diferentes Modelos Climáticos Globales. De acuerdo a Wilby and

Wigley [10], tres suposiciones están involucrados en la reducción de escala estadística:

- Los predictores son variables de relevancia y modelados de forma realística por los MCG
- El predictor representa la señal de cambio climático
- Las observaciones empíricas obtenidas son válidas bajo condiciones de cambio climático alteradas

Los escenarios de Cambio Climático son simulados por MCG usando concentraciones de gases de efecto invernadero como forzamiento del modelo. Estos forzamientos se usan con el fin de evaluar escenarios en el futuro. Los mejores escenarios de emisión de escenario son probablemente los contemplados en el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) [11]. Estos escenarios son usados actualmente para estudios de impactos y adaptaciones al Cambio Climático. Una limitante de estos escenarios es que no contemplan los efectos potenciales de las políticas de mitigación. Por lo que están siendo reemplazados por los escenarios de Caminos o Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés), los cuales, si contemplan políticas de mitigación de emisiones de gases. [12]

Existen cuatro Caminos Representativos de Concentración mostrados en Fig. 2, cada una de ellas es diseñada con el fin de cuantificar el cambio en el clima a futuro. Adicionalmente, ellos representan el forzamiento radiactivo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750. Así se tienen cuatro posibles RCP definidos en el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC [13]

- El RCP 8.5 es el escenario más severo y con mayores impactos debido al cambio climático debido a los altos niveles de emisiones de gases. Este escenario indica el aumento de la trayectoria de forzamiento radiactivo que conduce a 8.5 W/m^2 en el año 2100.
- El RCP 6.0 indica estabilización en 6 W/m^2 a partir del año 2100 sin translimitaciones.
- El RCP 4.5 indica estabilización en 4 W/m^2 a partir del año 2100 sin translimitaciones.
- El RCP 2.6 indica un máximo de 3 W/m^2 antes del año 2100 y posterior disminución.

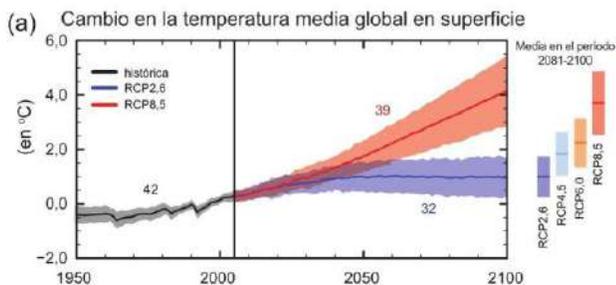


Fig. 2. Cambio temperatura promedio global para la serie 1950 - 2100 para un cambio en la temperatura promedio anual global de la serie 1986-2005. Fuente [14]

Incertidumbres son normalmente esperadas en las salidas de los modelos Climático Globales debido a que la tierra es un sistema complejo, en el cual incluye diferentes componentes con interacciones entre sí. Muchas de estas interacciones no han sido totalmente comprendidas en la actualidad.

En modelación climatológica, existen tres fuentes de incertidumbre

- **Incertidumbre en el escenario de emisiones de gases.** Desconocemos cual escenario se va adecuar al futuro; puede ser que ninguno de los cuatro escenarios descritos anteriormente sea el que suceda.
- **Incertidumbre en el modelo.** No tenemos un entendimiento completo de los procesos que suceden dentro de la tierra, y por lo tanto, se podría no estar caracterizando de forma adecuada. Adicionalmente, la resolución en grilla sugiere que los procesos en la tierra pueden estar incompletamente representados
- **Variabilidad natural.** Los MCG están contruidos de forma de ir aumentando concentraciones de gases a cada paso de tiempo, lo cual indica que estos modelos incorporan variabilidad natural. Por ejemplo, si se compara 2090 - 2099 con 2000 - 2009, se estaría reflejando no solo los impactos por emisiones de gases, sino también variabilidad natural; incluyendo procesos a larga escala multianual como es el fenómeno de El Niño.

Los escenarios han sido descritos como “descripciones creíbles y simplificadas de como el futuro podría desarrollarse basado en un conjunto de suposiciones coherente y consistente sobre las fuerzas impulsoras claves” [15] o simplemente son descripciones creíbles en como el futuro podría desarrollarse basado en proposiciones “si-entonces” [16].

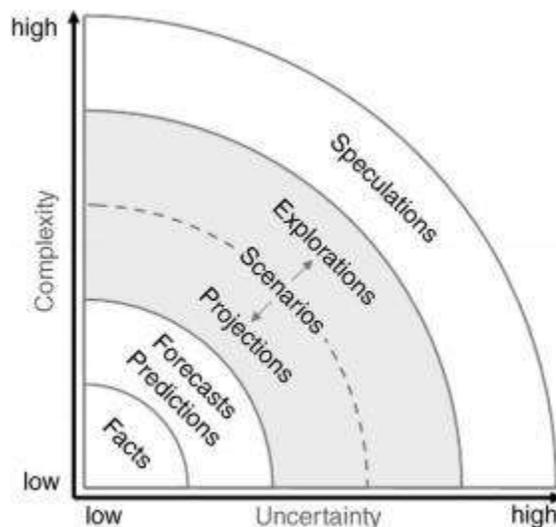


Fig. 3. Detalle de complejidad e incertidumbre de los escenarios, comparados a las predicciones, pronósticos y especulaciones. Fuente: Zurek and Henrichs [17]

El enfoque basado en escenarios es particularmente útil al abordar la considerable incertidumbre sobre trayectorias futuras en sistemas complejos, como es el caso de Cambio Climático (Fig. 3). Su incertidumbre podría surgir por un sistema complejo o podría estar relacionado a futuros desarrollos [17]. Los escenarios climáticos permiten proyectar futuras implicaciones. Sin embargo, no solamente se detalla la incertidumbre por la complejidad del sistema atmosférico, sino también una incertidumbre cualitativa, tales como ejercicios de política de mitigación desarrollada por las partes interesadas. Por esta razón, los modelos de escenarios conllevan más incertidumbre y complejidad, comparado a las incertidumbres por predicción o pronósticos, tal y como lo detalla la Fig. 3

III. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SALVADOR

En el año 2017 se desarrolló un proyecto de reducción de escala estadística de los Modelos Climáticos Globales (MCG) con el objetivo de obtener los escenarios de clima para El Salvador, en base a los nuevos escenarios de Caminos Representativo de Concentración (RCP). Para completar los objetivos descritos en el proyecto, se realizó un inventario de los MCG disponible en la base de datos del

proyecto CMIP5, y se descargaron los datos mensuales existentes para el periodo histórico 1961 – 2005 y para el periodo futuro comprendido entre el año 2011 y 2100, de las variables: precipitación, temperatura, humedad relativa, presión y dirección del viento. En total, se tomaron datos de 15 modelos climáticos globales.

Del número total de modelos (15) se seleccionaron los mejores 5 modelos (Ver Tabla 1) en base a una evaluación de mejor representación del clima en la zona tropical, con respecto a los registros históricos del periodo 1961 – 2005. Dicha selección se hizo en base en tres métricas: correlación (medida del grado de ajuste), BIAS o sesgo (medida de fiabilidad) y RMSE (medida de exactitud) [18].

Posterior a la selección de los mejores modelos, se procedió a la reducción de escala por medio de métodos estadístico usando el periodo de referencia 1961 – 1990 y para cada uno de los modelos mostrados en la Tabla 1 y cada Caminos Representativo de Concentración (RCP). Para la variable precipitación se usaron 39 estaciones de medición pluviométrica, mientras que la variable temperatura se usó 10 estaciones de medición histórica; estas estaciones corresponden a mediciones confiables y suficientes en El Salvador (Fig. 4).

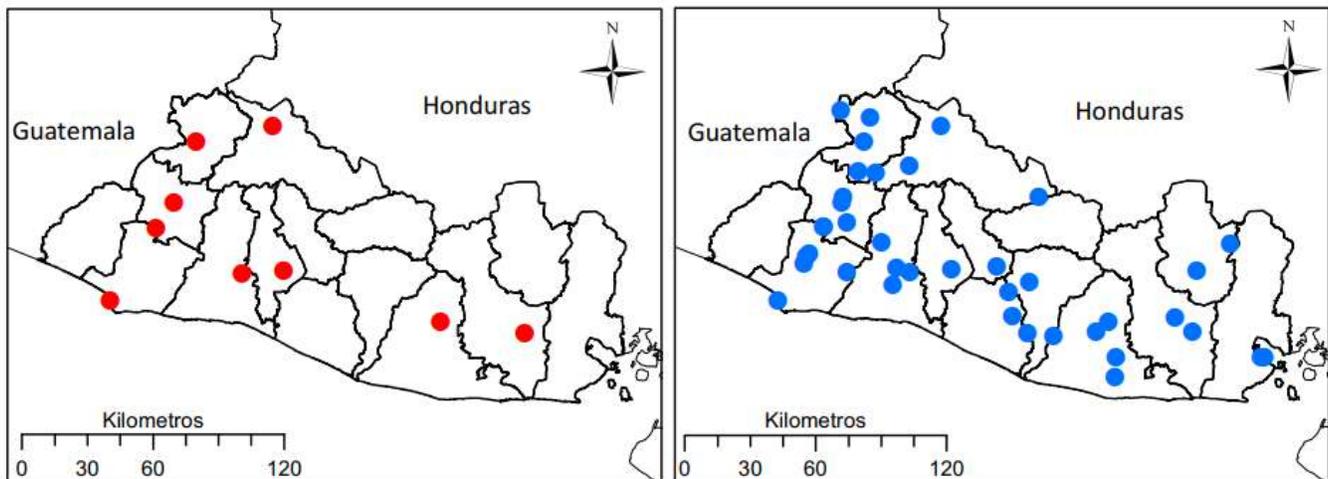


Fig. 4. Estaciones meteorológicas consideradas para reducción de escala para la variable temperatura (izquierda) y precipitación (derecha). Fuente elaboración propia en base a los productos brindados por CATHALAC [18]

Tabla 1. Modelos Climáticos Globales (MCG) usados en El Salvador para evaluar escenarios de Cambio Climático

Modelo	Institución
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute
HadGEM2-A0	Met Office Hadley Center
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo)
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

Posteriormente y de forma particular, se revisaron las salidas de precipitación y temperatura de los modelos seleccionados, removiendo del análisis al modelo GFDL-CM3 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) debido a que se observaron valores de precipitaciones mensuales mayores a 4,000 milímetros en algunas estaciones del país. Esta cantidad de precipitación está muy por encima de la mayor precipitación mensual registrada en el país, lo cual podría

generar resultados insatisfactorios en las modelaciones hidrológicas.

IV. SEQUIA HIDROLÓGICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Las Sequias son usualmente definidas como una deficiencia de precipitación sobre un periodo de tiempo extendido, el cual podría resultar en escases de agua para algunas actividades, grupo o sector ambiental. La literatura describe cuatro tipos de sequía, las cuales son la sequía meteorológica, el cual resulta por la falta de precipitación, la sequía agrícola relacionada a la escases de agua disponible para que crezcan las plantas, la sequía hidrológica relacionada a un periodo inadecuado de recursos superficial y subterráneo para satisfacer demanda del recurso hídrico y, la sequía socioeconómica, la cual está relacionada a la falla del sistema del recurso hídrico para satisfacer la demanda [19]. Entre los tipos de sequía definidos anteriormente, la sequía hidrológica es de mayor importancia debido a la gran dependencia de muchas actividades de industria, suministro de agua urbana y de generación de energía que se tiene de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

La forma más fácil de monitorear las sequias hidrológicas está basado en el cálculo de índices para estimar la magnitud, duración y extensión areal de la sequía. Estos índices de sequias fueron desarrollados para diferentes propósitos, como por ejemplo, para cuantificar los impactos de la falta de agua (sequia meteorológica). Otros indicadores fueron elaborados para cuantificar la falta de agua en la humedad del suelo y como afecta en la producción de cultivos. En este documento, se evaluarán dos índices. El primero es el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en ingles) y el otro es el Índice de Escorrentía Estandarizado (SRI, por sus siglas en ingles). Estos índices permiten cuantificar la sequía hidrológica producida por la disminución de la precipitación que alimenta reservorios, ríos y cuerpos de aguas naturales.

El SPI [7] es un índice de sequía meteorológica el cual cuantifica la falta de precipitación sobre un área y sobre un rango de escala de tiempo. En escala de tiempo pequeña, el valor del SPI está íntimamente relacionado a la humedad del suelo. De forma similar, el SPI puede ser relacionado a almacenamiento subterráneo y reservorios. El proceso de cálculo se realiza con valores de precipitaciones mensuales, los cuales son ajustados a una distribución Gamma o Pearson tipo III. Posteriormente, estos valores ajustados son transformados a una distribución normal. El valor del SPI puede ser interpretado como el número de desviaciones estándar, para el cual las anomalías observadas se desvían del promedio. [20, 21].

El SRI es un índice de sequía hidrológica basado en las mediciones de escorrentía que se tenga en una cuenca y que se puede elaborar para diferentes escala (mensual, semestral, anual). Este indicador surge de las recomendaciones brindadas por McKee (1993), en donde detalla que se puede

ocupar este índice en otras variables relacionada con las sequias, tales como son la escorrentía y humedad suelo. El procedimiento involucra el ajustar los datos a una función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en ingles) de los datos mensuales de escorrentía. Posteriormente, se obtiene con los parámetros de la PDF, la curva acumulada de densidad de probabilidad (CDF, por sus siglas en ingles). Esta CDF es transformada a una distribución normal estandarizada con cero de promedio y varianza igual a uno, lo cual resultará en el valor del SRI [22]. La selección de la función de distribución depende de la localización geográfica y de la agregación temporal. Sin embargo, se recomienda ajustar los datos mensuales de escorrentía en una distribución Log-Pearson tipo III y transformar los valores usando una transformación Box-Cox [23] con el fin de remover asimetría en los datos. Estos valores son posteriormente estandarizados usando la media y la desviación estándar de la serie transformada. [24].

Los valores de los índices SPI y SRI son clasificados conforme a los valores mostrados en la Tabla 2, en donde adicionalmente se proporciona la probabilidad de ocurrencia de cada nivel de severidad, la cual surge de forma natural de la función de probabilidad normal [24].

Tabla 2. Clasificación de los índices SPI y SRI con relación a su probabilidad de ocurrencia. Fuente: Vasiliades, et al. [24]

Índice Sequia (SPI y SRI)	Categoría	Probabilidad (%)
Mayor a 2.00	Extremadamente húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo	9.2
-0.99 a 0.99	Cercano a lo normal	68.2
-1.49 a -1.00	Moderadamente seco	9.2
-1.99 a -1.50	Muy seco	4.4
Menor a -2.00	Extremadamente seco	2.3

V. CASO DE ESTUDIO

El sistema de explotación (SE) Grande de San Miguel, se encuentra localizado en la zona oriental de El Salvador, con un área total de 2,397 km². La red hidrográfica comprende la cuenca del rio grande de San Miguel y cuenta con formaciones lagunares en donde destacan la laguna de Olomega y El Jocotal. Para la evaluación de los recursos hídricos, el sistema se conformó en un modelo semi-distribuido de 40 subcuencas y para las lagunas, se modelaron como elementos de embalse [25], tal y como se muestra en la Fig. 5 El modelo conceptual ocupado fue el modelo de Témez [26] el cual opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico [27].

El esquema conceptual del modelo de Témez es mostrado en Fig. 6, en donde se observa que el modelo está constituido

por el flujo entrante de precipitación, el cual se reparte entre una serie de flujos salientes e intermedios; además de almacenamientos interno [27].

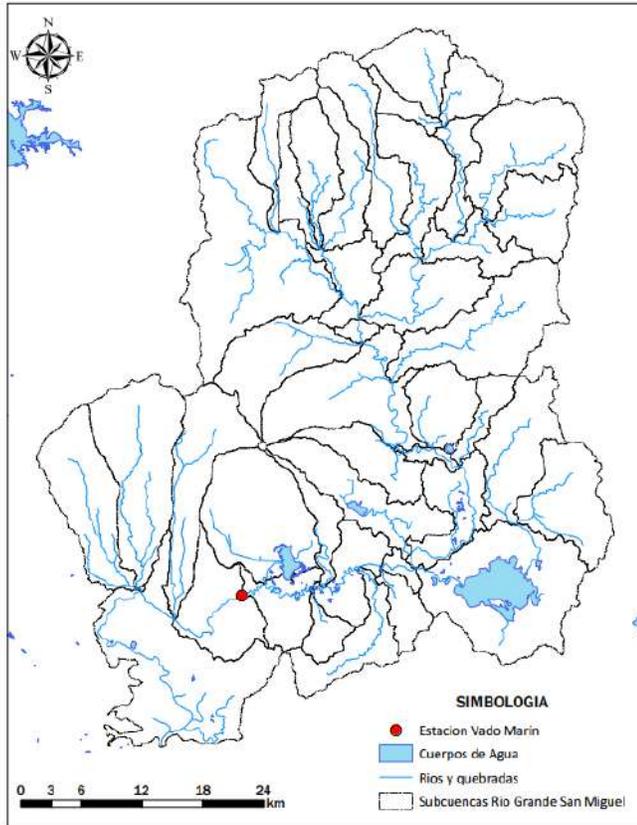


Fig. 5. Subcuencas analizadas en el Sistema de Explotación Grande de San Miguel. Nótese la ubicación de la estación de referencia Vado Marín. Fuente elaboración propia con base de datos MARN [25]

VI. PRE-PROCESAMIENTO DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICO.

Los escenarios climático de temperatura máxima, mínima y media fueron pre-procesadas con el fin de obtener la evapotranspiración mensual conforme a la fórmula de [28] y ajustado para Penman-Monteith, tal y como se definió en el Plan Nacional de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en El Salvador [25]. La fórmula a ocupar tiene la siguiente forma:

$$ET_p = 0.0023 * (t_{med} + 17.78) * R_s$$

$$R_s = R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

En donde ET_p es la evapotranspiración potencial, T_{max} es la temperatura máxima, T_{min} es la temperatura mínima, T_{med} es la temperatura media, R_s es la radiación solar incidente y R_o es la radiación solar extraterrestre.

Posteriormente, las unidades de evapotranspiración y precipitación de los cinco MCG y los cuatro escenarios de emisión de gases fueron interpolados usando la técnica de

interpolación “spline” definida en el Plan Nacional de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en El Salvador [25]. Este proceso fue realizado para todo El Salvador y para cada una de las cuencas definidas en dicho plan hídrico.

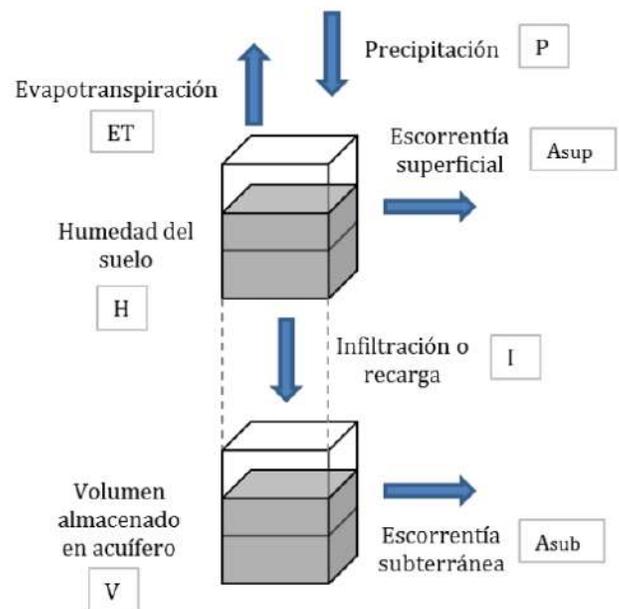


Fig. 6. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témex. Fuente Paredes-Arquiola, et al. [27]

VII. LÍNEA BASE E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para evaluar impactos por cambio climático, un periodo de 30 años continuos de información hidroclimática es usado para definir la línea base. La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en ingles) y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) definen y recomienda que el periodo de 30 años entre 1961 – 1990 sea usado para evaluar impactos. Este periodo de datos continuos contiene periodos secos, húmedos y con eventos hidrometeorológicos extremos. [2, 3]. Para el caso de estudio definido en el Sistema de Explotación (SE) Rio Grande de San Miguel se obtuvo información de aportaciones en cuatro puntos: Vado Marín, Moscoso, El Delirio y Villerías (Fig. 5). Sin embargo, esta información no cuenta con periodos continuos y que estén dentro del periodo de referencia o línea base. Una limitante de este estudio es la definición continua de la línea base o referencia para estudios de impacto de cambio climático en recursos hídricos, debido a que el mayor registro histórico continuo observado fue de 22 años en la cuenca del Rio Paz, limítrofe entre El Salvador y Guatemala.

Entre las estaciones de medición dentro del cauce del Rio Grande de San Miguel, solamente la estación Vado Marín tiene 18 años de registro continuos en el periodo 1965 – 1981. Por lo que se definió este sitio para el cálculo de

precipitación, evapotranspiración y aportes hídricos mensuales promedios, mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Línea base o de referencia (1961 - 1990) para la cuenca del Río Grande San Miguel en evapotranspiración (Eto), precipitación (P) y Aportaciones hídricas (Q) El promedio mensual de las aportaciones fueron calculadas en base al periodo 1965 – 1981

Mes	ET _o (mm)	P (mm)	Q (hm ³)
Enero	136.08	1.36	25.45
Febrero	133.90	2.01	21.78
Marzo	159.61	4.66	25.40
Abril	154.70	39.98	24.01
Mayo	132.38	190.51	34.14
Junio	113.06	302.97	102.56
Julio	127.28	215.45	83.61
Agosto	118.53	265.06	100.72
Septiembre	96.96	362.32	190.47
Octubre	97.92	229.85	210.48
Noviembre	98.64	45.06	77.48
Diciembre	119.46	4.86	34.69
Promedio	124.04	138.67	77.57

VIII. ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se realizaron comparaciones multimodelo entre el periodo de referencia y los tres periodos de tiempo a futuro: 2011 – 2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2100 y para cada uno de los cuatro Caminos Representativos de Concentración (RCP). Adicionalmente, se evaluó el porcentaje de cambio en las variables precipitación, evapotranspiración y aportación hídrica en base a la siguiente fórmula:

$$\%_{\text{cambio}} = 100 * \frac{(X_{\text{hor}} - X_{\text{ref}})}{X_{\text{ref}}}$$

En donde, X_{ref} es el valor promedio mensual de la serie de referencia, X_{hor} es el valor promedio mensual para los periodos futuros definidos anteriormente.

De forma similar, se evaluó los índices de sequías SPI y SRI en una escala de 12 meses, con el fin de cuantificar la amenaza hidrometeorológica de sequía para cada uno de los Caminos Representativos de Concentración.

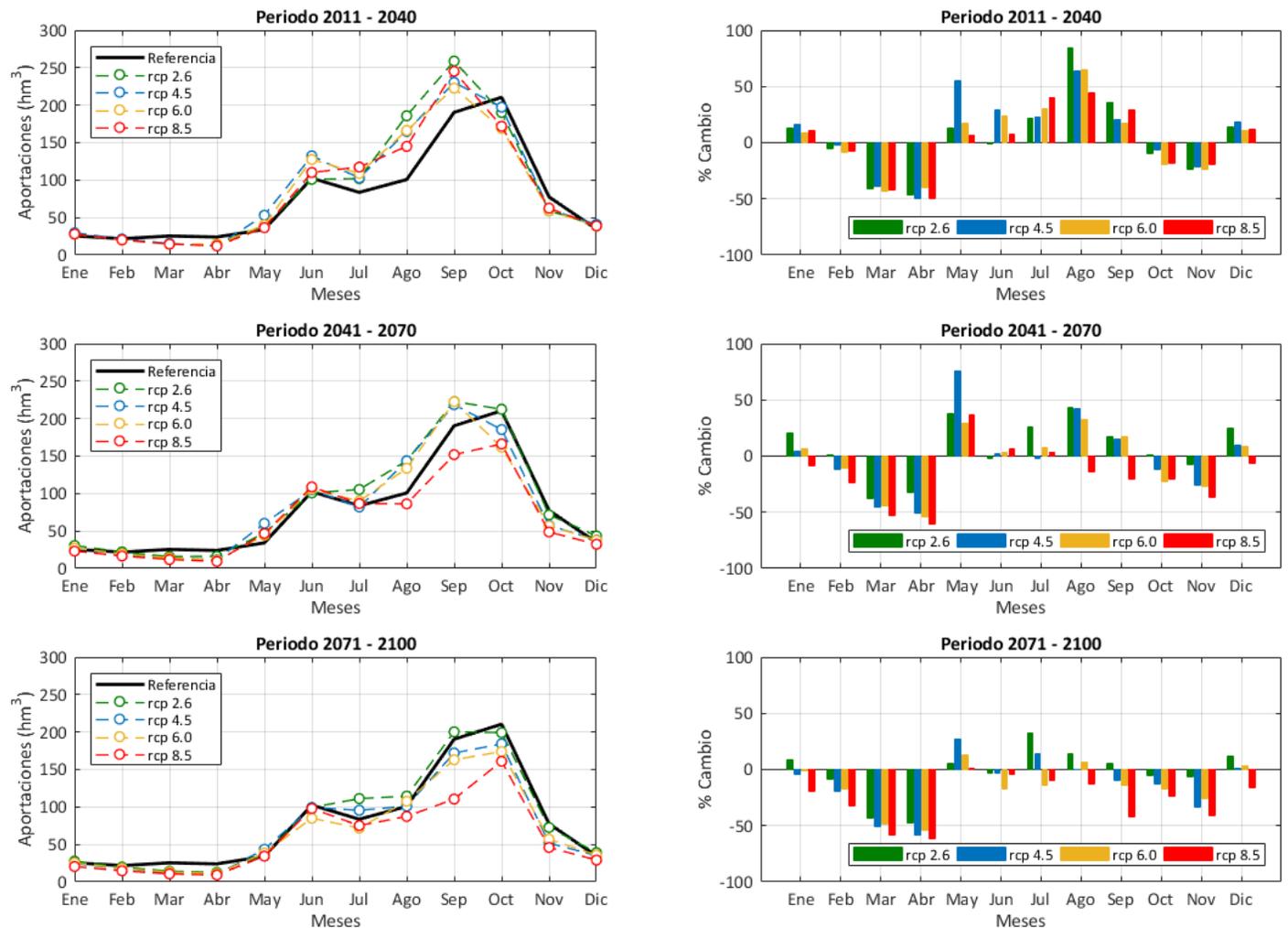


Fig. 7. Aportaciones mensuales promedios (izquierda) y cambio porcentual (derecha) para cada escenario de emisión de gases y para los periodos 2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100 en la cuenca del Río Grande de San Miguel. Resultados en base a la línea de referencia 1965 – 1980.

A. Cambios estimados en las aportaciones hídricas.

Los impactos estimados en las aportaciones promedio mensuales para los tres periodos de tiempo a futuro y los cuatros Caminos de Representativos de Concentración (RCP) son mostrados en la Fig. 7. Se puede observar para el periodo 2011 – 2040, que las aportaciones promedio en cada escenario de RCP podrían aumentar para el mes de septiembre. Sin embargo, debe tomarse en cuenta la temporalidad de las aportaciones hídrica, en donde, en los meses de febrero, marzo, abril, octubre, y noviembre existiría una disminución cercana al 50% de las aportaciones hídricas para este periodo. Otro punto interesante, es el pequeño cambio en el régimen hídrico comparado a las aportaciones de referencia (1965 – 1981) ya que para los meses de septiembre se tendrían las mayores aportaciones mensuales. Adicionalmente, para el periodo 2041 – 2070 se observaría un cambio en el régimen hídrico comparado con las aportaciones de referencia, la cual tendría un mayor énfasis en el escenario RCP 8.5. Lo anterior se reflejaría en

una disminución de las aportaciones en los meses marzo y abril. Para el final del siglo (periodo 2071 – 2100) se observaría una drástica disminución en las aportaciones hídricas en la mayoría de los meses del año, siendo el escenario RCP 8.5 el que brinda impactos negativos para todos los meses del año. Lo anterior quiere decir que si se sigue haciendo lo mismo de siempre en cuanto a las políticas de emisión de gases de efecto invernadero, se tendría disminución significativa de las aportaciones promedio en cada uno de los meses del año.

De forma resumida, se observa un cambio de régimen hídrico en las aportaciones hídricas de la cuenca del Río Grande de San Miguel, siendo más fuertes para el escenario RCP 8.5 y al final del siglo. Nuevamente, la temporalidad en las aportaciones hídricas es un aspecto importante a considerar cuando se concluye en si existirá escasez o abundancia de las aportaciones hídrica, ya que como se pudo observar, no en todos los meses se observa mayores aportaciones comparadas a los valores de referencia del periodo 1965 – 1981.

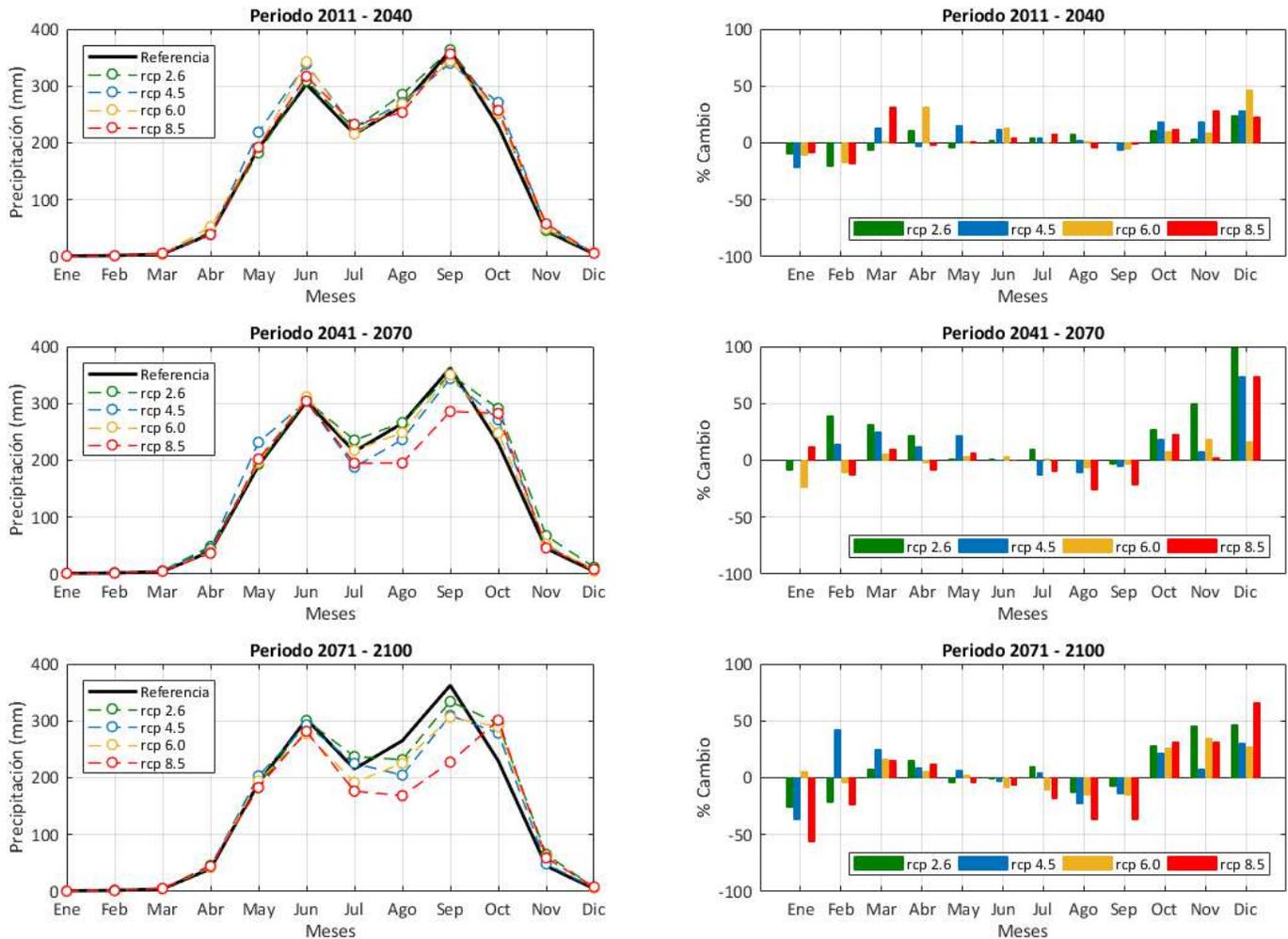


Fig. 8. Precipitaciones mensual promedio (izquierda) y cambio porcentual (derecha) para cada escenario de emisión de gases y para los periodos 2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100 en la cuenca del Río Grande de San Miguel. Resultados en base a la línea de referencia 1961 – 1990

B. Cambios estimados en la precipitación

Con relación a la precipitación promedio en la cuenca de estudio se estiman variaciones importantes en el escenario RCP 8.5 (Fig. 8). Por ejemplo, en el periodo de tiempo a futuro comprendido entre los años 2011 y 2040, se puede observar un comportamiento similar a la línea base, mostrando impactos cercanos al 30%. De igual forma, para el periodo 2041 – 2070, se podría observar un cambio moderado de la precipitación mensual, principalmente para

el escenario RCP 8.5, en donde se podría tener reducciones de precipitaciones de hasta 21% en el mes de septiembre. Finalmente, para el periodo de final de siglo (2071 – 2100) los impactos por cambio climático estarían más marcados, debido a las reducciones de precipitaciones mensuales promedio, principalmente en los meses que comprende la época lluviosa. Este último análisis para el final de siglo, sustenta lo mencionado en las aportaciones hídricas para el mismo periodo, en donde se observa una reducción de agua disponible en los meses de época lluviosa

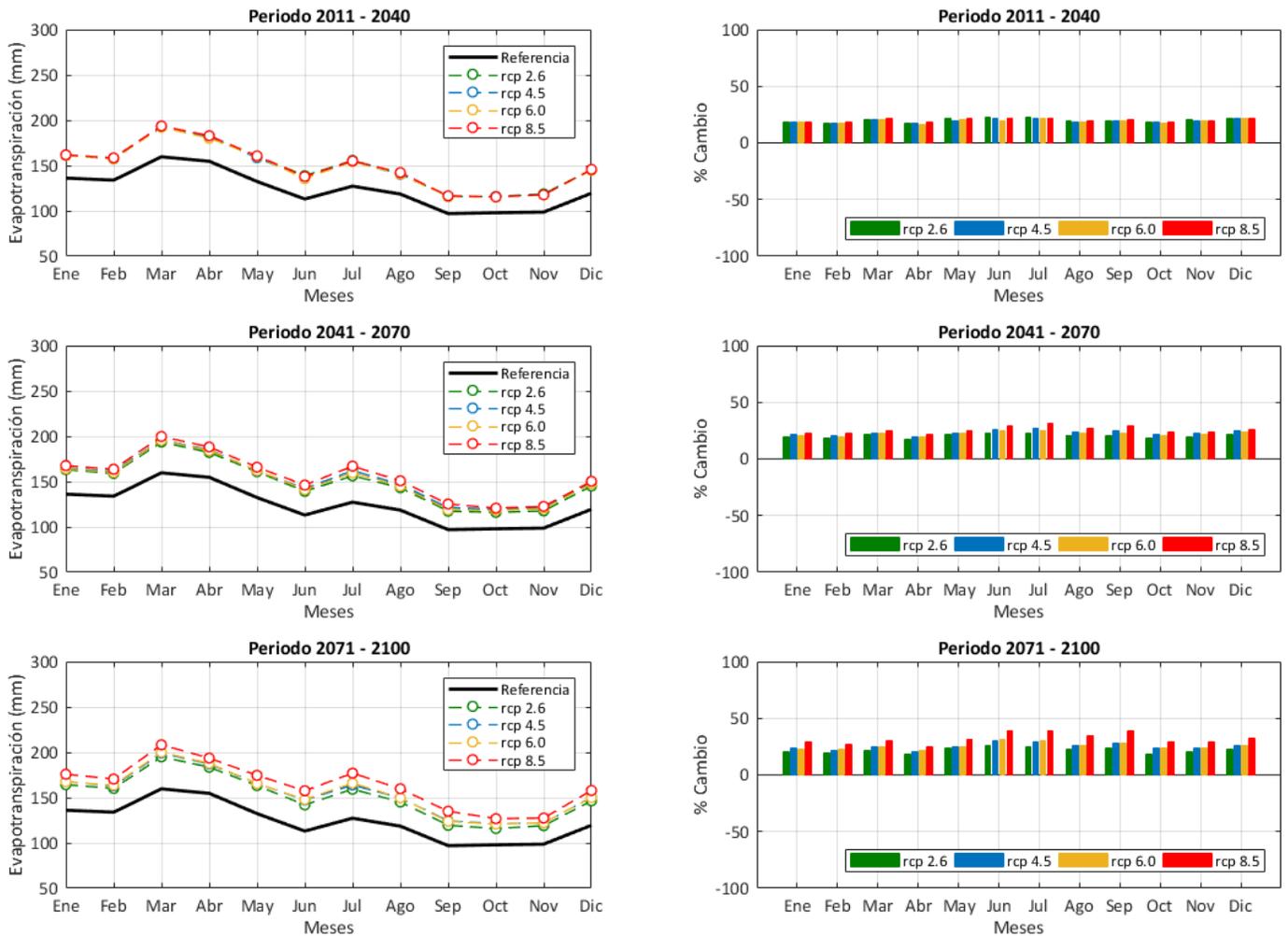


Fig. 9. Evapotranspiración mensual promedios (izquierda) y cambio porcentual (derecha) para cada escenario de emisión de gases y los periodos 2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100 en la cuenca del Rio Grande de San Miguel. Resultados en base a la línea de referencia 1961 – 1990.

C. Cambios estimados en la evapotranspiración

Con relación a la evapotranspiración, se muestra en la Fig. 9 las comparaciones mensuales entre el periodo de referencia o línea base (1961 – 1990) y los tres periodo de tiempo a futuro que contempla este análisis. Para este tipo de variable, se puede observar un aumento de la evapotranspiración en la cuenca, con respecto a los valores históricos. Para ilustrar lo anterior, el periodo de tiempo comprendido entre los años

2011 – 2040, se puede observar un aumento de la evapotranspiración, sin mostrar diferencias entre los diferentes escenarios de cambio climático. Para el periodo de tiempo futuro 2041 – 2070, se observa un comportamiento similar al anterior, mostrando una leve diferencia entre los resultados promedio de los escenarios climáticos, siendo el escenario RCP 8.5, el que mayor valor de evapotranspiración aporta. Para el periodo de tiempo a final de siglo, se observa la diferencia entre escenarios más marcada entre ellas, siendo siempre el escenario RCP 8.5 el

que mayor aporte de evapotranspiración brinda a la atmósfera. Lo anterior podría deberse a que la temperatura es la fuerza principal en el cálculo de la evapotranspiración, por lo que este escenario brinda un aumento de temperatura de hasta 4 °C, siendo reflejado en la evapotranspiración con una mayor cantidad de agua que fluye de regreso a la atmósfera.

Basados en los resultados multimodelo para cada uno de los escenarios de RCP, la cuenca del Río Grande de San Miguel podría tener una tendencia a aumentar los valores de evapotranspiración y disminuir la tendencia en las

aportaciones totales. La Fig. 10 ejemplifica este proceso, en donde se le aplicó una media móvil de 10 años a los porcentajes de cambio en evapotranspiración y aportes hídricos, con referencia a la línea base 1961 – 1990. Lo anterior, con el objetivo de suavizar la variabilidad temporal que muestran dichas variables. Se puede observar, que la evapotranspiración podría aumentar en un 26% en un promedio multiescenario y las aportaciones hídricas podrían disminuir en un 12% en promedio multiescenario para el final del siglo. Por lo tanto, más agua es transformada en evapotranspiración y menos agua podría estar disponible en la superficie como escorrentía, al final del siglo.

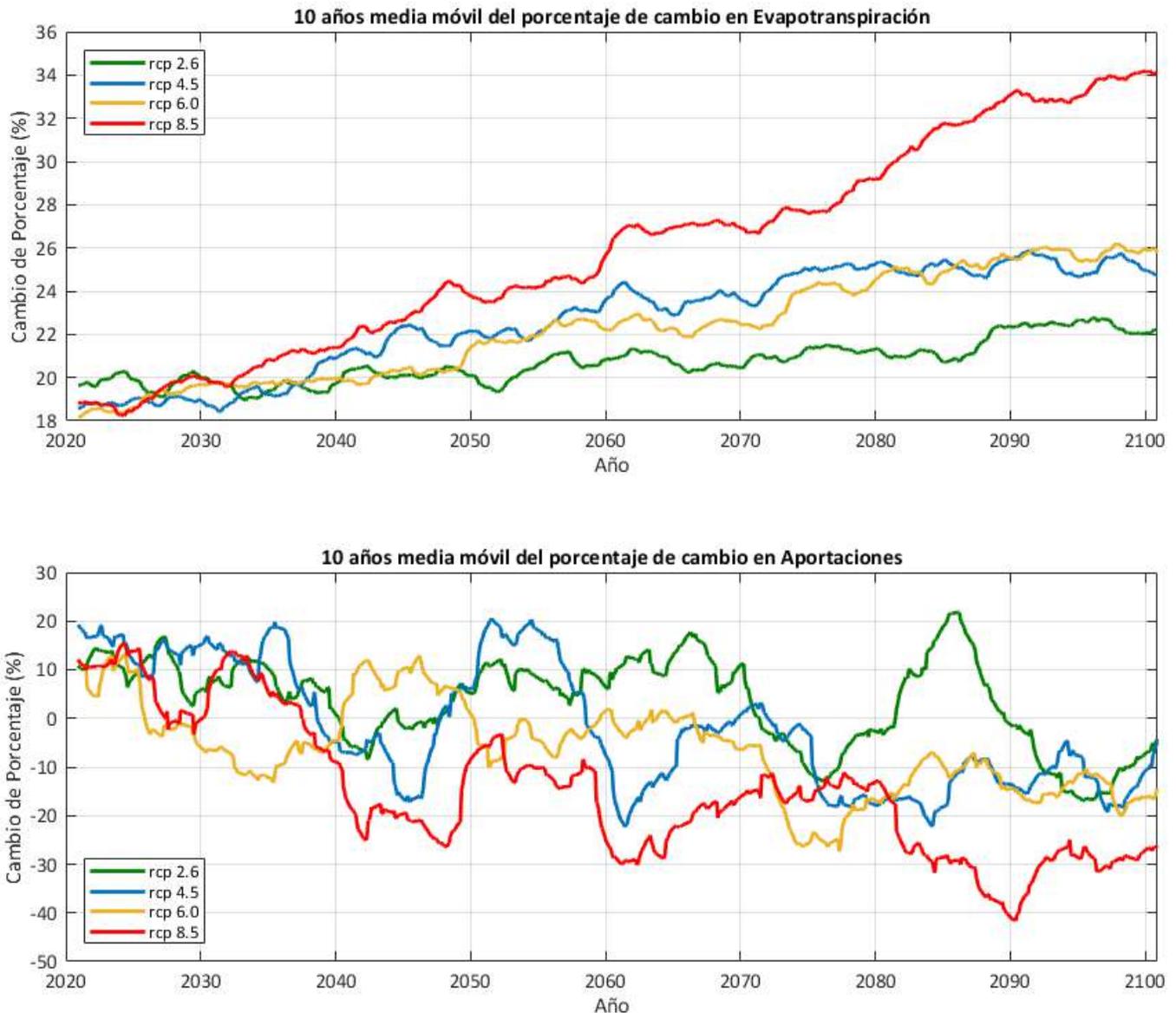


Fig. 10. Media móvil de 10 años de los cambios porcentuales en la evapotranspiración (arriba) y aportaciones hídricas (abajo) para el periodo 2011 – 2100 y cada escenario de emisión de gases.

D. Cuantificación de sequías relacionada con Cambio Climático.

Para la cuantificación de las sequías hidrológicas se decidió ocupar conjuntamente el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI), debido a recomendaciones en la literatura. El resultado del cálculo de los índices multimodelo para escenario RCP 8.5 se muestra en Fig. 11, en donde se observa un aumento de las frecuencias de periodos secos

(SPI y SRI menores a -1.50), principalmente a finales del siglo. De igual forma, se observa aumento en la duración de las sequías hidrológicas para este escenario pesimista, el cual podría ser producto de la disminución en las aportaciones mensuales, el aumento en la evapotranspiración y la disminución de las precipitaciones. Por lo tanto, se podría tener sequías hidrológicas más severas e intensa comparada a la serie histórica 1961 – 1990, si ninguna acción es tomada como reducción de las emisiones gases de efecto invernadero que producen el cambio climático.

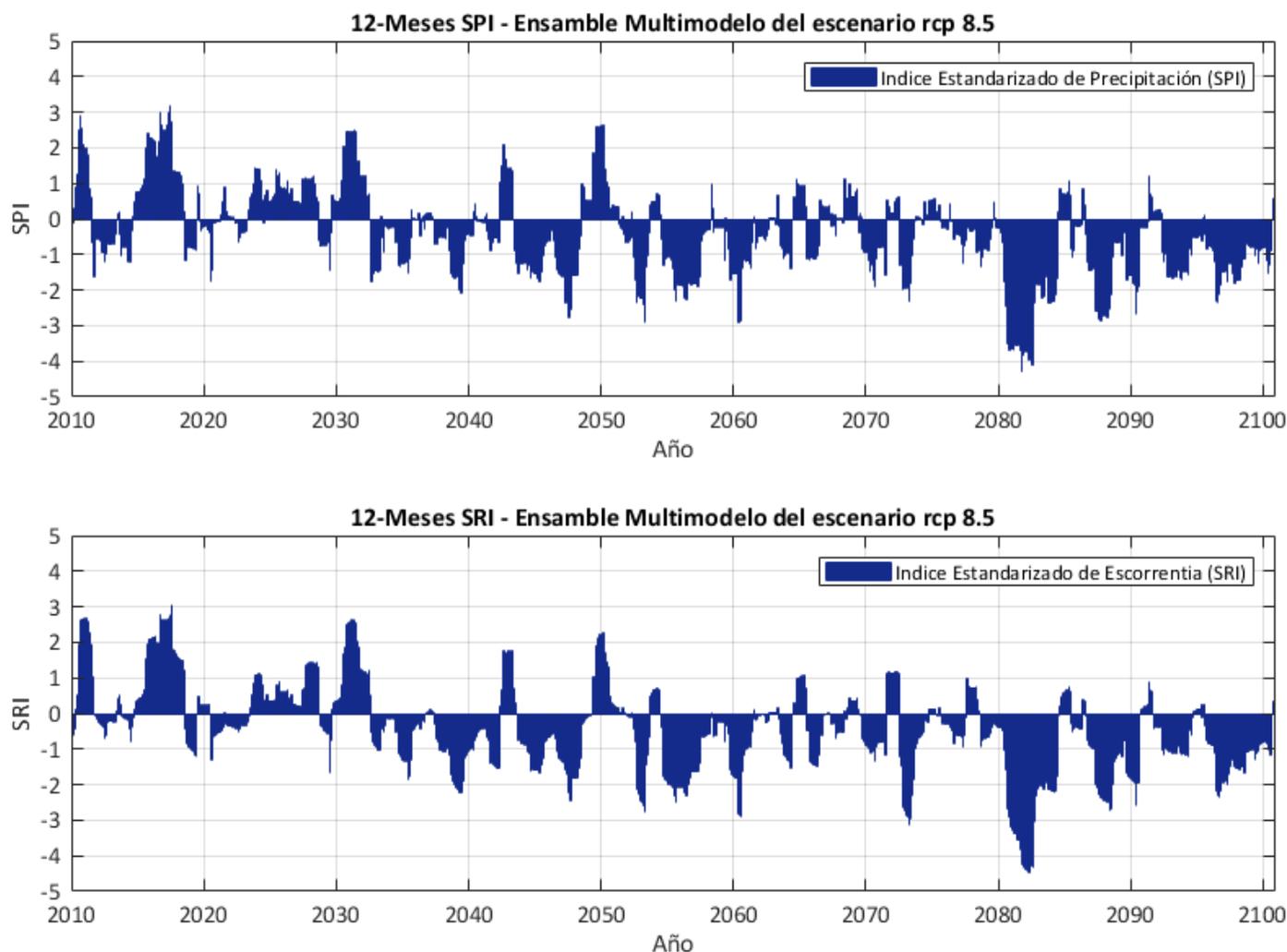


Fig. 11. Variaciones en la serie de tiempo de los índices SPI y SRI usando ensamble multimodelo para el escenario de emisión de gases RCP 8.5.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio pretende evaluar los impactos del Cambio Climático en la cuenca del Río Grande de San Miguel usando los modelos de escenarios de cambio climático disponible en la base de datos del proyecto CMIP5. De los modelos seleccionados, se redujeron la escala por medio de métodos estadísticos y para el periodo a futuro 2011 - 2100. La variable temperatura de cada MCG

y escenario de Caminos Representativos de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés) fue utilizada para el cálculo de Evapotranspiración por el método de Hargreaves y ajustado para Penman-Monteith, tal y como fue definido en el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador [25]. Posteriormente, esta variable y la precipitación fueron interpoladas usando el método "Spline". Esta información fue utilizada para forzar la corrida del modelo hidrológico de Témez [26] y de esta

forma, obtener proyecciones de aportaciones hídricas hasta el año 2100 y en cada una de las subcuencas definidas en el Plan Hídrico de El Salvador.

Adicionalmente, se definió la línea base o de referencia en la cuenca del Río Grande de San Miguel para las variables aportaciones hídricas (hm^3), precipitación (mm) y evapotranspiración (mm) para el periodo 1960 – 1991. Sin embargo, no se pudo obtener un registro de aportaciones hídricas histórica continua para el periodo de referencia. De forma similar, se definió a periodos de tiempo a futuro, 2011 – 2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2100; con el objetivo de evaluar el cambio en las variables hidroclimáticas promedios mensuales con respecto a la línea de referencia. Además, se realizó un análisis de sequía hidrológica en base al escenario más desfavorable (RCP 8.5) y para el periodo 2011 – 2100.

Los resultados muestran una disminución significativa de las aportaciones hídricas mensuales, principalmente para los meses febrero, marzo y abril. La temporalidad es un aspecto importante en la cuantificación del impacto por cambio climático en las aportaciones hídricas, debido a que no en todos los meses se observa una disminución promedio de las aportaciones hídricas. Esto podría malinterpretarse y brindar conclusiones erróneas de que el recurso hídrico estará disponible, debido a que algunos meses se muestra un incremento y en otros un descenso de las aportaciones hídricas. Debe tenerse en cuenta también que para el periodo 2071 – 2100 se observa una reducción significativa de las aportaciones en todos los escenarios de Camino de Concentración Representativa (RCP), siendo el más severo el producido por el ensamble multimodelo del escenario RCP 8.5.

El comportamiento de la precipitación muestra una disminución de las precipitaciones promedio en los meses de época lluviosa, comparada a la serie histórica 1961 – 1990. De igual forma, se registra un cambio en el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca, posterior al año 2041, ya que se observan periodos de lluvia mensual promedio menores a 150 milímetros en los meses de julio y agosto.

Con relación a la evapotranspiración, esta variable muestra incremento de hasta un 30% con relación a los valores de referencia (1961 – 1990) y para cada uno de los escenarios de emisión de gases que producen el efecto de cambio climático. Para el periodo de tiempo a futuro entre el año 2011 – 2040, el comportamiento entre escenario es muy similar. Sin embargo, para el periodo de tiempo 2071 – 2100, se observan mayores variaciones de evapotranspiración para el escenario RCP 8.5.

El impacto en el balance hídrico de la cuenca del Río Grande de San Miguel se visualizó por medio de la tendencia de los diferentes escenarios de emisión de gases a futuro, en donde se observó que la variable evapotranspiración muestra una tendencia a aumentar, mientras que la variable aportaciones

muestra una tendencia a disminuir durante el periodo 2011 – 2100. Es de hacer notar que para cada uno de los análisis multimodelo de los escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), se observó el mismo comportamiento, siendo el escenario RCP 8.5 el que mayor porcentaje de cambios muestra.

La sequía hidrológica fue cuantificada en base al análisis de dos índices: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y Escorrentía (SRI). El primero es un índice basado en las cantidades de precipitaciones mensuales, el cual puede evaluarse para 1, 3 y 12 meses, siendo este último el que es normalmente usado para evaluar sequías en reservorios o en ríos. El SRI es un índice que se basa en el comportamiento mensual de la escorrentía, el cual es transformado por medio de la técnica Box-Cox [23], con el fin de remover el sesgo y el curtosis estadístico de los datos. Los resultados fueron validados en base al registro histórico de la estación Vado Marín y se proyectó para el periodo 2011 – 2100. Los resultados muestran que para el escenario RCP 8.5 se muestra un incremento en la frecuencia y la duración de los eventos de sequía hidrológica para el final de siglo. Este resultado indica que si las políticas de cambio climático no se desarrollan, se podría tener una disminución severa de las aportaciones mensuales al final de siglo.

Este documento muestra específicamente los resultados de impactos del cambio climático para la cuenca hidrográfica del Río Grande de San Miguel. Sin embargo, debe hacerse notar que se realizó este análisis y simulaciones para todos las Regiones Hidrográficas de El Salvador. Por lo que se recomienda desarrollar un plataforma informática el cual pueda visualizar los distintos escenarios de cambio climático y sus impactos en las subcuencas que contempla el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico [25].

REFERENCIAS

- [1] CoastAdapt. (2017). *How to understand climate change scenarios*.
- [2] N. Mujere and S. Eslamian, "Climate change impacts on hydrology and water resources," *Handbook of Engineering Hydrology*, vol. 2, pp. 113-126, 2014.
- [3] IPCC, "Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to Assessment Report Four of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)," *Cambridge, UK*, 2007.
- [4] J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, D. J. Griggs, and K. Maskell, *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*: WMO, 1997.
- [5] S. Piao, P. Ciais, Y. Huang, Z. Shen, S. Peng, J. Li, *et al.*, "The impacts of climate change on water

- resources and agriculture in China," *Nature*, vol. 467, p. 43, 2010.
- [6] NOAA, "Top 10 Breakthroughs – The First Climate Model," ed. Washington, 2012.
- [7] T. B. McKee, N. J. Doesken, and J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales," in *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993, pp. 179-183.
- [8] F. Giorgi, B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. Von Storch, P. Whetton, *et al.*, "Regional climate information—evaluation and projections," 2001.
- [9] J. C. F. Lo, Z. L. Yang, and R. A. Pielke, "Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, 2008.
- [10] R. L. Wilby and T. Wigley, "Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships," *International Journal of Climatology*, vol. 20, pp. 641-661, 2000.
- [11] N. Nakicenovic, J. Alcamo, A. Grubler, K. Riahi, R. Roehrl, H.-H. Rogner, *et al.*, *Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change*: Cambridge University Press, 2000.
- [12] R. Moss, J. Edmonds, K. Hibbard, M. Manning, S. Rose, D. P. van Vuuren, *et al.*, "A new approach to scenario development for the IPCC Fifth Assessment Report," *Nature*, vol. 463, pp. 747-756, 2010.
- [13] E. R. Camino, J. R. P. Ruggeroni, and F. H. Hernández, "Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas," *Tiempo y Clima*, vol. 5, 2014.
- [14] IPCC, "The physical science basis," *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Nations: Geneva*, 2013.
- [15] M. Millennium Ecosystem Assessment, "Ecosystems and human well-being," ed: Island Press Washington, DC, 2005.
- [16] S. Isoard and T. Henrichs, "European environment outlook," 2005.
- [17] M. B. Zurek and T. Henrichs, "Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments," *Technological forecasting and social change*, vol. 74, pp. 1282-1295, 2007.
- [18] CATHALAC, "Elaboración de Escenario de Clima para El Salvador," 2017.
- [19] D. A. Wilhite and M. H. Glantz, "Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions," *Water international*, vol. 10, pp. 111-120, 1985.
- [20] N. B. Guttman, "Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35, pp. 311-322, 1999.
- [21] WMO, "Standardized precipitation index user guide," ed: World Meteorological Organization Geneva, 2012.
- [22] A. M. Abril and J. G. Treviño, "Standardized Runoff Index (SRI)," *WFD, Common Implementation Strategy-Water Scarcity and Droughts Expert Group*, vol. 12, p. 2012, 2012.
- [23] G. E. Box and D. R. Cox, "An analysis of transformations," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pp. 211-252, 1964.
- [24] L. Vasiliades, A. Loukas, and N. Liberis, "A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece," *Water resources management*, vol. 25, pp. 1087-1101, 2011.
- [25] MARN, *Plan Nacional de Gestión Integrada de Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias*: Ministerio Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, 2015.
- [26] J. R. T. Peláez, *Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación"*: Asociación de Investigación Industrial Eléctrica, 1977.
- [27] J. Paredes-Arquiola, A. Solera Solera, J. Andreu Álvarez, and N. Lerma Elvira, "Manual técnico de la herramienta EVALHID para la evaluación de recursos hídricos," *Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universitat Politècnica de València*, 2012.
- [28] G. H. Hargreaves and Z. A. Samani, "Reference crop evapotranspiration from temperature," *Applied engineering in agriculture*, vol. 1, pp. 96-99, 1985.