



DYNA

ISSN: 0012-7353

Universidad Nacional de Colombia

García-Garizábal, Iker; Romero, Paola; Jiménez, Samantha; Jordá, Luis
Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático

DYNA, vol. 84, núm. 203, 2017, Octubre-Diciembre, pp. 37-44

Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.59600>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49655603005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Climate change effects on the climate dynamics of coastal Ecuador

Iker García-Garizábal ^{a,b}, Paola Romero ^a, Samantha Jiménez ^a & Luis Jordá ^a

^a Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. ikergarizabal@gmail.com, plromero@espol.edu.ec, sjimenez@espol.edu.ec, ljbordehore@gmail.com

^b PROMETEO. Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación -SENESCYT. Quito, Ecuador.

Received: August 16th, 2016. Received in revised form: June 26th, 2017. Accepted: September 18th, 2017

Abstract

The study presented herein characterizes climate for historical series (1982-2011) of average temperature and precipitation, also including future projections (2012-2099) for the Province of Santa Elena, westernmost point of continental Ecuador, which presents desert environment in the intertropical belt. The historical analysis shows increasing temperatures (0,038 °C/year) and precipitation (0,196 mm/year). Comparison of historical and generated (65 climate models) climate determines scenario ECHOG A2 as the most appropriate to reproduce the climate of the zone. This model predicts increases in temperature (+2,7 °C), precipitation (+8,2%), and in maximum annual rain values, at the end of the XXI century. Evolution of temperature and precipitation does not lead to changes in annual climate characteristics, which is maintained as Semiarid, but the aridity index decreases monthly, from January to April.

Keywords: Temperature, precipitation; aridity index; climate models; trend.

Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático

Resumen

Este trabajo caracteriza el clima de la serie histórica (1982-2011) de temperatura media y precipitación y sus proyecciones futuras (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena, región más occidental del Ecuador continental con características desérticas en el cinturón intertropical. El análisis histórico muestra aumentos de temperatura (0,038 °C/año) y precipitación (0,196 mm/año). La comparación del clima histórico y generado por 65 modelos climáticos determina al escenario ECHOG A2 como más adecuado para reproducir el clima de la zona. Dicho modelo predice a final del siglo XXI aumentos en la temperatura media (+2,7 °C), precipitación (+8,2%) y en los valores máximos de lluvia anual. La evolución de la temperatura y precipitación no lleva cambios en las características de clima anual que se mantiene como Semidesértico árido, si bien mensualmente disminuye la aridez de enero a abril.

Palabras clave: Temperatura; precipitación; índice de aridez; modelos climáticos; tendencia.

1. Introducción

El grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) pone de manifiesto que el calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero es un hecho constatado con el que se prevén importantes cambios en gran cantidad de variables climáticas [1]. Entre ellas, destacan precisamente la temperatura, en la que se detecta una tendencia creciente de 0,74 °C entre 1901-2005, y las precipitaciones, en las que a pesar de su alta variabilidad espacial puede evidenciarse un aumento generalizado en regiones septentrionales y una reducción en las más

meridionales.

El IPCC recoge la necesidad de establecer medidas de adaptación y mitigación de cara al cambio climático, si bien, dada la complejidad del sistema Tierra, es imposible detallar actuaciones a nivel mundial y resulta necesario desarrollar estudios locales. Con el propósito de estudiar el impacto del cambio climático y poder anteponerse a los cambios previstos, centros de investigación han desarrollado modelos capaces de hacer proyecciones climáticas. Web-sites como la del Canadian Climate Change Scenarios Network (www.cccsn.ec.gc.ca) recopilan estos modelos y los ponen a disposición.

How to cite: García-Garizábal, I., Romero, P., Jimenez, S. and Jordá, L., Evolución climática en la costa de Ecuador por efecto del cambio climático DYNA, 84(203), pp. 37-44, December, 2017.

Los modelos climáticos están orientados a la creación de escenarios climáticos futuros que permitan crear y evaluar con tiempo estrategias de gestión a las nuevas condiciones climáticas. No obstante, resulta imprescindible analizar cada modelo de manera individual, ya que a escala local los diferentes modelos y escenarios pueden arrojar resultados variados para una misma zona de estudio. Aun así, todos los modelos coinciden con que las regiones áridas y semiáridas son más sensibles a los cambios climáticos que las regiones húmedas [2].

En la costa pacífica de Sudamérica se han desarrollado algunos estudios que analizan la evolución de la temperatura [3-7] y la precipitación [5,8-16] y que han permitido crear una línea base de información para analizar las características del clima actual y su futura evolución. En este sentido, aunque para la temperatura los trabajos detectaron tendencias positivas similares a los encontrados a nivel mundial, son de destacar los valores de negativos de la costa Chilena [3,6]. Para la precipitación se encontraron comportamientos mucho más heterogéneos espacial y temporalmente, si bien parece aumentar el número de eventos de alta precipitación y espaciado de las lluvias [9].

Aunque los trabajos anteriores aportan valiosa información del comportamiento y tendencias del clima, es necesario desarrollar estudios climáticos más locales a fin de conocer la problemática climática de cada zona para poder planificar actuaciones concretas [17-19].

Este hecho debe ser tenido en cuenta especialmente en el entorno del Ecuador, al plantearse como un caso particular en Sudamérica, pues por su posición en la región del ecuatorial-tropical bajo la influencia de las corrientes de Humboldt y El Niño [20-22] y la dinámica de los vientos alisios con la cordillera andina, confiere a esta región una alta variedad climática, que abarca desde regiones interiores con climas tropicales de abundantes y constantes lluvias hasta regiones con características desérticas en los que la ocurrencia de precipitaciones es casi mínima [23-25].

Así pues, este trabajo pretende caracterizar la dinámica termo-pluviométrica y determinar el modelo de cambio climático más adecuado para analizar el impacto del cambio climático en la evolución climática de la Provincia de Santa Elena (PSE), región más occidental de Ecuador continental y que presenta características desérticas.

2. Metodología

2.1. Información climática de la zona de estudio

La zona de estudio está localizada en la región más occidental del Ecuador, siendo limitada al oeste por el Océano Pacífico y de norte a este por la cordillera Chongón-Colonche. Se extiende entre $-1,6^{\circ}$ y $-2,5^{\circ}$ S a $-81,0$ y $-80,2^{\circ}$ W y cubre una extensión de 3782 km². La topografía es plana y homogénea con una ligera pendiente W-SW que le lleva en su zona Norte a 807 m de altitud, y una altura media es de 125 msnm (Fig. 1).

La zona dispone de seis series homogéneas de temperatura media (T) [26] y cinco de precipitación (P) [27] con registros históricos desde 1982 hasta la actualidad gestionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

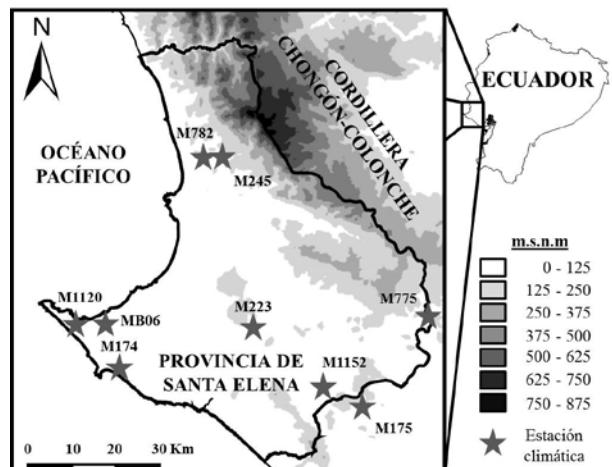


Figura 1. Localización de la Provincia de Santa Elena y estaciones climáticas de temperatura y precipitación disponibles.
Fuente: Los autores.

(INAMHI) y el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). A partir de las 11 series climáticas se construyeron las series de referencia de temperatura media y precipitación de la PSE calculadas bien como la media de los datos de temperatura mensual o como la mediana de la precipitación mensual.

2.2. Caracterización climática

Dado que el panel intergubernamental del cambio climático aconseja períodos de estudio mínimos de 30 años y los modelos climáticos disponibles en la web (www.cccsn.ec.gc.ca) necesitan datos entre 1961 y el año actual, el periodo 1982-2011 fue el utilizado para caracterizar la evolución histórica del clima en la zona.

A partir de los datos anuales y mensuales de precipitación se determinó el Índice de Aridez de De Martonne (IA) [28] que clasifica el clima en Desierto hiperárido (IA < 5), Semidesértico árido (IA: 5-10), Semiárido mediterráneo (IA: 10-20), Subhúmedo (IA: 20-30), Húmedo (IA: 30-60) y Perhúmedo (IA > 60).

$$IA_{\text{anual}} = \frac{P_{\text{anual}}}{(T_{\text{anual}}+10)} \quad IA_{\text{mes}} = 12 \cdot \frac{P_{\text{mes}}}{(T_{\text{mes}}+10)}$$

Para analizar la evolución del clima se elaboraron análisis de tendencia (τ). Dada la no normalidad en las series de precipitación y con el propósito de aplicar una única metodología de análisis para todas las series de datos, se aplicó el test no paramétrico de rangos de Mann-Kendall [29-30] a un nivel de significancia estadística del 5%, calculando la pendiente de Sen [31] como cuantificador de la tendencia. Así mismo, se empleó la mediana como medida más adecuada de la tendencia central de distribuciones de datos debido al régimen pluviométrico de carácter extremo positivo y negativo que se da en esta región costera asociada al fenómeno ENSO.

2.3. Proyecciones de cambio climático

Para seleccionar el modelo-escenario climático que más se ajusta a las condiciones de la zona de estudio, se llevó a cabo un análisis de la evolución temperatura media y precipitación de 24 modelos climáticos y sus diferentes escenarios de evolución desarrollados por 16 instituciones de investigación y disponibles a través de la web Canadian Climate Change Scenarios Network (www.cccsn.ec.gc.ca) y basados en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: BCM2.0-Run 1, CGCM3T47-Mean, CGCM3T63-Run 1, CNRMCM3-Run 1, CSIRO Mk3.0-Run 1, CSIRO Mk3.5-Run 1, ECHAM5OM-Mean, ECHO-G-Mean, FGOALS-g1.0-Mean, GFDL CM2.0-Run 1, GFDL CM2.1-Run 1, GISS-AOM-Mean, GISS-EH-Mean, GISS-ER-Run 1, HADCM3-Run 1, HADGEM1-Run 1, INGV-SXG-Run 1, INMCM3.0-Run 1, IPSLCM4-Run 1, MIROC3.2 hires-Run 1, MIROC3.2 MEDRES-Mean, MRI CGCM2.3.2a-Mean, NCAR CCSM3-Mean, NCAR PCM-Mean.

En este sentido, todos los escenarios son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad. Los tres escenarios que proponen los modelos fueron tomados de las cuatro familias propuestas por el IPCC, y que describen las relaciones entre las distintas influencias de las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles así como su evolución durante el siglo XXI. Cada línea evolutiva representa un cambio demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental:

- Línea evolutiva y familia de escenarios A1: describe un mundo futuro con rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B)
- Línea evolutiva y escenarios A2: describe un mundo muy heterogéneo con una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- Línea evolutiva y escenarios B1: describe un mundo convergente con una misma población mundial, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.
- Línea evolutiva y escenarios B2: describe un mundo en el que predominan soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, con aumento progresivo de población mundial aunque a menor ritmo que A2, y niveles de desarrollo económico intermedios.

La elección del modelo climático más adecuado se hizo en base a la comparación de las medias (temperatura), medianas (precipitación) y tendencias históricas (1982-2011) respecto a las proyecciones que arrojan los modelos (2012-2099). Esta hipótesis ya fue empleada por Moratiel et al. (2010) [32] y García-Garizábal et al. (2014) [19] para elaborar predicciones de cambio climático, y es acorde a la propuesta de mantenimiento de tendencias [33-34] en parámetros de calibración-validación de escenarios de cambio climático. En este sentido, al elegir el modelo, la tendencia de temperatura prevaleció sobre la precipitación al resultar un parámetro menos complejo de cálculo en las proyecciones de cambio climático [34-35].

Para organizar la información generada en los 65 escenarios de cambio climático y elegir el escenario de más adecuado para la PSE, se utilizaron las aplicaciones informáticas GCMgen (Global Climate Models generator) [36] y FuCHSIA (Future Climate and Hydrological Scenarios for environmental management and Assessment) [37], que además de automatizar el proceso de generación de escenarios climáticos de temperatura y precipitación para 2012-2099, ejecuta el cálculo de tendencias según el test de Mann-Kendall.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización climática histórica

La temperatura media anual en la PSE es de 24,3 °C con una baja variabilidad interanual ($CV = 2,7\%$; Fig. 2). Intraanualmente se diferencia un periodo de alta temperatura de Diciembre a Mayo (25,8 °C) y otro de menor temperatura de Junio a Noviembre (22,9 °C), si bien en ambos la variación de temperaturas también resulta baja ($CV = 4,0$ a 4,9 %).

La mediana de la precipitación entre 1982-2011 fue de 260,4 mm/año, con una alta variabilidad ($CV = 227\%$) asociada al régimen pluviométrico extremo que se da en esta región costera asociada al fenómeno ENSO y que alcanza los 2579 mm en 1998 (Fig. 2). De igual manera, la precipitación está irregularmente distribuida en el año, con una estación lluviosa de diciembre a mayo en la que ocurre el 97% de la lluvia, y una seca de junio a noviembre con unas precipitaciones prácticamente nulas.

De acuerdo al índice de aridez, el clima de la PSE queda clasificado como Semidesértico árido (IAanual 1982-2011=7,6), si bien la variabilidad pluviométrica que hay en la zona

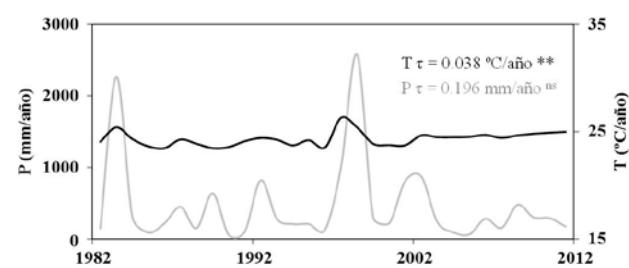


Figura 2. Evolución anual y tendencia (τ) de la temperatura media (T , °C/año; negro) y la precipitación (P , mm/año; gris) en la zona de estudio el periodo 1982-2011. Significancia estadística: ns = No significativo; $^+$ = $p < 0,1$; $*$ = $p < 0,05$; $**$ = $p < 0,01$; $***$ = $p < 0,001$.

Fuente: Los autores.

lleva al índice anual hasta valores anuales de Perhúmedo (IAanual 1998= 72,9) asociado a la ocurrencia de altos eventos de precipitación producto del fenómeno climático de “El Niño”. Mensualmente el IA también presenta una alta variabilidad debido a la estacionalidad de las precipitaciones, y mientras que durante la estación seca el clima es siempre Desierto hiperárido (IA= 0), durante la estación de lluviosa varía de Desierto hiperárido (IAdiciembre= 1,2) a Húmedo (IAmarzo= 36,5).

El análisis de la serie histórica de temperatura evidencia un aumento significativo de $0,038^{\circ}\text{C}/\text{año}$, y aunque a nivel mensual todas las tendencias de temperatura resultan positivas, los incrementos mensuales resultan heterogéneos. Así, los mayores valores de tendencia ocurren en el periodo de más altas temperaturas diciembre-mayo con tasas de $0,035$ a $0,065^{\circ}\text{C}/\text{mes}$, mientras que entre junio y noviembre los valores de tendencia se sitúan entre los $0,017^{\circ}\text{C}/\text{mes}$ y los $0,045^{\circ}\text{C}/\text{mes}$, agrupando los únicos meses en los que las tendencias carecieron de significancia estadística (Fig. 3).

En relación a otros estudios de tendencia de temperatura desarrollados en la costa Pacífica, las tasas de incremento superiores a los $0,01^{\circ}\text{C}/\text{año}$ detectados por Vuille et al. (1939-2006) [5] y los $0,025^{\circ}\text{C}/\text{año}$ de Falvey y Garreaud (1976-2006) [6] y similares a los $0,036^{\circ}\text{C}/\text{año}$ de Mark y Seltzer (1951-1999) [4] en Perú.

En el caso de la precipitación, aunque durante el periodo histórico 1982-2011 se detecta una tasa positiva en la evolución de precipitación de $0,196\text{ mm/año}$, dicho aumento no fue estadísticamente significativo (Fig. 2).

Así mismo, la evolución de la precipitación mensual tiene un comportamiento irregular, pues aunque se detectan tendencias positivas para la lluvia en enero, febrero y abril, los meses de marzo y diciembre arrojaron tendencias negativas, presentando los meses restantes valores de pendiente de cero, todas ellas carentes de significancia estadística (Fig. 3).

El comportamiento de la precipitación en la PSE resulta similar al encontrado en otras zonas de la costa Pacífica Sudamericana, y a pesar de la amplia variabilidad en los resultados de tendencias reportados, con valores de evolución intraanual positivos y negativos [12-14], se detectan tendencias regionales de carácter positivo en zonas más próximas a las regiones tropicales y tendencias de tipo negativo en zonas más alejadas de los trópicos [5,8].

3.2. Modelos climáticos

Los 24 modelos de cambio climático desarrollados en la PSE arrojan un amplio rango de evolución de la temperatura

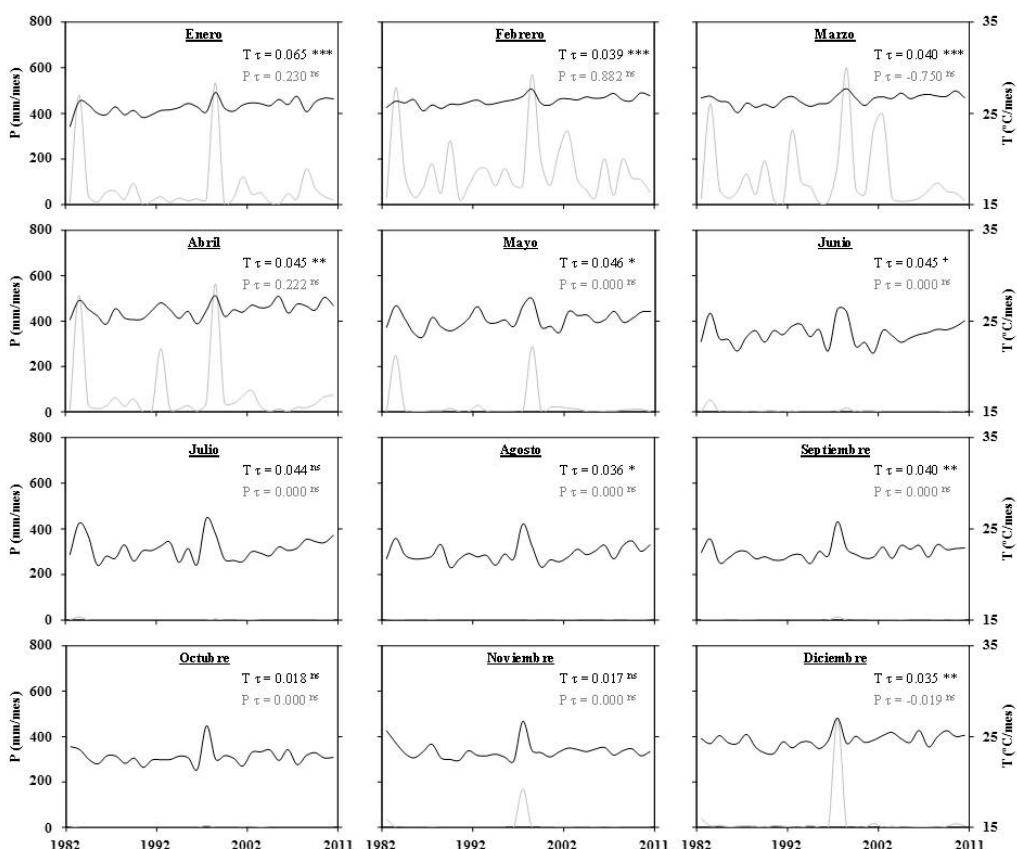


Figura 3. Evolución mensual de la temperatura media (T; negro) de la Precipitación (P; gris) en la zona de estudio para el periodo 1982-2011. Tendencia absoluta (τ ; $^{\circ}\text{C}/\text{mes}$; mm/año). Significancia estadística: ns = No significativo; $+$ = $p < 0,1$; $*$ = $p < 0,05$; $**$ = $p < 0,01$; $***$ = $p < 0,001$.
Fuente: Los autores.

Tabla 1.

Valor medio de temperatura media (T) y precipitación (P) anual y tendencia (τ) en la serie histórica (1982-2011) y proyecciones GCM (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena. Significación estadística: ^{ns} = No significativo; ⁺ = $p<0,1$; ^{*} = $p<0,05$; ^{**} = $p<0,01$; ^{***} = $p<0,001$.

		T °C/año	T τ °C/año	P mm/año	P τ mm/año		T °C/año	T τ °C/año	P mm/año	P τ mm/año	
Histórico		24,3	0,038***	260,4	0,196 ^{ns}	GISSAOM	A1B	25,3	0,022***	299,7	0,409 ^{ns}
BCM2	A1B	25,4	0,028***	454,3	0,068 ^{ns}	GISSAOM	B1	25,1	0,016***	272,1	0,258 ^{ns}
BCM2	A2	25,4	0,035***	454,6	0,779 ^{ns}	GISSEH	A1B	25,4	0,023***	252,4	0,123 ^{ns}
BCM2	B1	25,0	0,019***	596,7	2,033 ^{ns}	GISSER	A1B	25,6	0,022***	386,7	0,867 ^{ns}
CGCM3P47	A1B	25,9	0,029***	277,7	0,249 ^{ns}	GISSER	A2	25,8	0,027***	402,5	3,151*
CGCM3T47	A2	26,2	0,040***	254,6	0,145 ^{ns}	GISSER	B1	25,3	0,011***	397,5	1,018 ^{ns}
CGCM3T47	B1	25,5	0,018***	270,7	0,156 ^{ns}	HADCM3	A1B	26,4	0,040***	308,6	0,388 ^{ns}
CGCM3T63	A1B	25,8	0,026***	300,8	0,554 ^{ns}	HADCM3	A2	26,5	0,051***	315,8	0,914 ^{ns}
CGCM3T63	A2	26,1	0,036***	282,5	0,419 ^{ns}	HADCM3	B1	25,8	0,025***	279,4	0,052 ^{ns}
CGCM3T63	B1	25,5	0,017***	273,8	0,327 ^{ns}	HADGEM1	A1B	25,9	0,035***	322,4	-0,069 ^{ns}
CNRMCM3	A1B	26,1	0,028**	682,2	0,687 ^{ns}	HADGEM1	A2	25,9	0,043***	310,8	0,343 ^{ns}
CNRMCM3	A2	26,1	0,049***	580,2	3,446 ^{ns}	INGVSXG	A1B	25,9	0,026***	322,1	0,690 ^{ns}
CNRMCM3	B1	25,4	0,017*	679,2	1,331 ^{ns}	INGVSXG	A2	26,1	0,037***	357,5	0,422 ^{ns}
CSIROMK30	A1B	25,4	0,027***	264,3	0,517 ^{ns}	INMCM30	A1B	25,8	0,020***	276,5	0,441 ^{ns}
CSIROMK30	A2	25,7	0,031***	264,8	0,294 ^{ns}	INMCM30	A2	26,0	0,032***	253,7	0,202 ^{ns}
CSIROMK30	B1	25,1	0,019***	259,7	0,365 ^{ns}	INMCM30	B1	25,5	0,018***	262,1	0,348 ^{ns}
CSIROMK35	A1B	26,1	0,034***	297,3	0,723 ^{ns}	IPSLCM4	A1B	26,0	0,036***	282,4	0,835 ^{ns}
CSIROMK35	A2	26,2	0,041***	265,5	0,649 ^{ns}	IPSLCM4	A2	26,1	0,043***	296,4	1,070 ^{ns}
CSIROMK35	B1	25,7	0,022***	269,5	0,045 ^{ns}	IPSLCM4	B1	25,5	0,020***	272,6	0,351 ^{ns}
ECHAM5OM	A1B	26,2	0,042***	298,5	1,860 ⁺	MIROC32H	A1B	26,5	0,039***	264,8	0,038 ^{ns}
ECHAM5OM	A2	26,1	0,048***	307,0	1,752 ⁺	MIROC32H	B1	26,0	0,026***	281,4	0,476 ^{ns}
ECHAM5O	B1	25,6	0,028***	337,1	0,957 ^{ns}	MIROC32M	A1B	25,9	0,033***	253,8	0,412 ^{ns}
ECHOG	A1B	25,9	0,033***	280,5	0,212 ^{ns}	MIROC32M	A2	26,0	0,040***	239,9	0,139 ^{ns}
ECHOG	A2	25,9	0,039***	276,5	0,199 ^{ns}	MIROC32M	B1	25,4	0,021***	245,9	0,426 ^{ns}
ECHOG	B1	25,4	0,019***	268,9	0,090 ^{ns}	MRICGCM32A	A1B	25,6	0,025***	360,7	1,605 ^{ns}
FGOALS	A1B	25,5	0,027***	328,9	0,942 ^{ns}	MRICGCM32A	A2	25,6	0,031***	350,3	2,077 ⁺
FGOALS	B1	25,2	0,017***	309,9	0,665 ^{ns}	MRICGCM32A	B1	25,2	0,019***	357,8	1,454 ^{ns}
GFDLCM20	A1B	25,8	0,028***	264,0	0,243 ^{ns}	NCARCCSM3	A1B	25,7	0,021***	255,1	0,581 ^{ns}
GFDLCM20	A2	25,9	0,032***	255,5	0,429 ^{ns}	NCARCCSM3	A2	25,9	0,035***	242,0	0,750 ^{ns}
GFDLCM20	B1	25,3	0,015***	255,8	0,204 ^{ns}	NCARCCSM3	B1	25,2	0,011***	262,7	0,511 ^{ns}
GFDLCM21	A1B	25,6	0,025***	313,5	0,362 ^{ns}	NCARPCM	A1B	25,2	0,019***	253,7	-0,210 ^{ns}
GFDLCM21	A2	25,8	0,031***	293,0	0,227 ^{ns}	NCARPCM	A2	25,2	0,024***	256,1	-0,134 ^{ns}
GFDLCM21	B1	25,2	0,014***	297,8	0,136 ^{ns}	NCARPCM	B1	24,8	0,008*	267,8	0,222 ^{ns}

Fuente: Los autores.

y precipitación anual, y mientras todas las combinaciones de modelo-escenario predicen para el periodo 2012-2099 aumentos en la temperatura, en el caso de la precipitación un 18% de los escenarios indican descensos en los aportes de las lluvias con respecto al escenario histórico de referencia 1982-2011 (Tabla 1).

Así, las diferentes combinaciones de escenarios predicen para el periodo 2012-2099 tendencias de carácter positivo para la temperatura, de entre 0,008 °C/año con un aumento medio de +0,44°C en el escenario NCARPCM B1 y los 0,051 °C/año e incremento medio de la temperatura de +2,16°C en el escenario HADCM3 A2, frente a los más heterogéneos resultados de la precipitación, con tasas que variaron entre los -0,21 mm/año y descenso en la lluvia del -2,6% en el escenario NCARPCM A1B y los +3,45 mm/año con aumento de la lluvia un 122,7% en el escenario CNRMCM3 A2 (Tabla 1).Sólo 12 de los 65 escenarios de temperatura presentaron valores de tendencia positivos del mismo orden o superiores al del escenario histórico, que los califican como candidatos según el criterio de mantenimiento-incremento de tendencias [33]. En el caso de la precipitación, 62 de los escenarios arrojan valores de tendencia positiva, al igual que la serie de referencia 1982-2011.

De los 12 posibles escenarios de temperatura, sólo los correspondientes al modelo ECHOG A2 y MIROC32HIRES A1B con una tendencia de 0,039 °C/año, presentan la tasa de

incremento más similar a la de la serie histórica 1982-2011 de 0,038 °C/año. En cambio, para la precipitación, sólo el modelo ECHOG en el escenario A2 que presenta una tendencia de 0,199 mm/año, tiene el valor de pendiente más parecido al del escenario de referencia de 0,196 mm/año.

De esta manera, considerando los resultados de tendencia de los 65 escenarios de cambio climático construidos, parece apropiado indicar que el escenarios A2 del modelo ECHOG es el más adecuado para reproducir las características climáticas de la PSE.

3.3. Proyecciones climáticas

Durante el periodo 2012-2099, el escenario de evolución ECHOG A2 arroja un incremento tanto de la temperatura como de la precipitación, y aunque dicho aumento ocurre de manera irregular durante el periodo analizado, si bien para todo el periodo simulado se determina una aumento en la temperatura media de 1,6 °C y del 6,2% en la precipitación con respecto al escenario de referencia (Fig. 4).

La variabilidad de la temperatura media anual se incrementa gradualmente desde la serie histórica, y aunque durante 2012-2040 hay un aumento en la temperatura de 0,51 °C, su variabilidad se mantiene en el 2,8%. De igual manera, aunque durante el treintenio 2041-2070 la temperatura pasa a

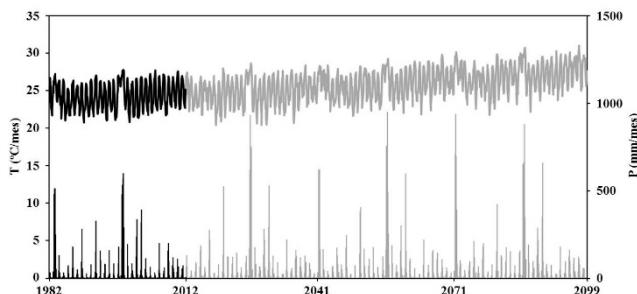


Figura 4. Evolución anual de la temperatura media (T; °C/año) y precipitación (P; mm/año) para el periodo 1982-2011 (negro) y según los datos de la proyección climática del modelo ECHOG en el escenario A2 para el periodo 2012-2099 (gris) en la Provincia de Santa Elena.

Fuente: Los autores.

incrementarse 1,56 °C respecto al periodo de referencia, el coeficiente de variación apenas presenta cambios al mantenerse en el 3,2%, variabilidad que se mantiene en el 3,3 % entre 2071-2099 pero con un aumento de temperatura de 2,71 °C respecto a la serie histórica.

Mensualmente, la evolución de la temperatura en el escenario ECHOG A2 siguen un comportamiento análogo a las de la serie de 1982-2011 tanto en valores de pendiente como en los niveles de significancia estadística, a excepción de los meses históricos de enero, en el que la tasa de aumento resulta muy superior al del resto del año, y octubre-noviembre, en los que las tasas de incremento resultan más bajas a las del conjunto anual (Tabla 2).

La precipitación presenta una irregular evolución durante el siglo XXI, pues aunque para el periodo más inmediato 2012-2040 la mediana de la precipitación (262,2 mm/año) apenas presenta variación con respecto al escenario histórico (260,4 mm/año), sí hay un aumento en los valores de máxima precipitación anual hasta los 3341 mm, aunque manteniendo su variabilidad (CV= 240%).

Este comportamiento se repite durante los siguientes treintenarios, donde además de repetirse valores precipitación anual similares a los del periodo histórico, las medianas de la

Tabla 2.

Tendencias (τ) mensuales y anual para la temperatura media (T; °C/año) y precipitación (P; mm/año) en la serie histórica (1982-2011) y la proyección del modelo ECHOG A2 (2012-2099) en la Provincia de Santa Elena. Significancia estadística: ns = No significativo; $^+$ = $p < 0,1$; $*$ = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.

	1982-2011		2012-2099	
	τ T °C/año	τ P mm/año	τ T °C/año	τ P mm/año
Enero	0,065***	0,230 ns	0,034***	0,079 ns
Febrero	0,039***	0,822 ns	0,035***	0,420 ns
Marzo	0,040***	-0,750 ns	0,036***	0,002 ns
Abril	0,045**	0,222 ns	0,040***	0,019 ns
Mayo	0,046*	0,000 ns	0,044***	0,009 ns
Junio	0,045 $^+$	0,000 ns	0,040***	0,000 ns
Julio	0,044 ns	0,000 ns	0,048***	0,000 ns
Agosto	0,036*	0,000 ns	0,045***	0,000 ns
Septiembre	0,040**	0,000 ns	0,034***	0,000 ns
Octubre	0,018 ns	0,000 ns	0,033***	0,000 ns
Noviembre	0,017 ns	0,000 ns	0,039***	0,000 ns
Diciembre	0,035**	-0,019 ns	0,035***	0,000 ns
Anual	0,038***	0,196 ns	0,039***	0,199 ns

Fuente: Los autores.

precipitación aumentan ligeramente ($P_{2041-2070}=276,1$ mm/año; $P_{2071-2099}=281,8$ mm/año) y los máximos de precipitación anual superan los 3000 mm.

Los escenarios mensuales de precipitación según el modelo ECHOG A2, reflejan en su mayoría unas tendencias de evolución muy similares a las de la serie histórica, especialmente durante el periodo de abril a noviembre, con los menores aportes de lluvia. En cambio, los meses con mayores precipitaciones acumulan valores máximos de pendiente en la serie histórica, si bien para el periodo 2011-2099 las pendientes positivas se reducen a la tercera parte y la mitad en enero y febrero mientras que las negativas de marzo y diciembre pasan a positivas (Tabla 2).

En cuanto al índice de aridez, según la evolución climática del escenario ECHOG A2, durante los tres treintenarios del siglo XXI el valor de IA se sitúa entre 7,5-7,6, quedando el clima clasificado como Semidesértico árido, mismas características al establecido en el periodo histórico 1982-2011 (Tabla 3).

Tabla 3.

Valores mensuales y anual del Índice de Aridez (IA) en la serie histórica 1982-2011 y para los treintenarios 2012-2040, 2041-2070 y 2071-2099 según la proyección del modelo ECHOG A2, y tendencias (τ) para el periodo 2012-2099 en la Provincia de Santa Elena. Significancia estadística: ns = No significativo; $^+$ = $p < 0,1$; $*$ = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.

	1982-2011		2012-2099		2012-2040		2041-2070		2071-2099	
	IA	τ IA								
Enero	9,3	0,068 ns	10,2	0,017 ns	9,4	0,008 ns	10,6	0,008 ns	10,5	0,008 ns
Febrero	36,5	0,192 ns	35,7	-0,016 ns	38,8	0,008 ns	34,7	0,008 ns	35,6	0,008 ns
Marzo	19,4	-0,240 ns	22,1	-0,008 ns	21,8	0,002 ns	22	0,002 ns	26,8	0,002 ns
Abril	8,6	0,066 ns	9,9	0 ns	9,5	0,002 ns	10,5	0,002 ns	8,8	0,002 ns
Mayo	1,3	0 ns	1,3	0,002 ns	1,2	0 ns	1,4	0 ns	1,9	0 ns
Junio	0,1	0 ns	0,1	0 ns	0	0 ns	0,1	0 ns	0,1	0 ns
Julio	0	0 ns								
Agosto	0,1	0 ns	0,1	0 ns	0	0 ns	0,1	0 ns	0,1	0 ns
Septiembre	0,1	0 ns								
Octubre	0	0 ns								
Noviembre	0	0 ns								
Diciembre	1,2	-0,009 ns	1	0 ns	1	0 ns	1,2	0 ns	0,9	0 ns
Anual	7,6	0,008 ns	7,7	0,000 ns	7,5	0,000 ns	7,7	0,000 ns	7,6	0,000 ns

Fuente: Los autores.

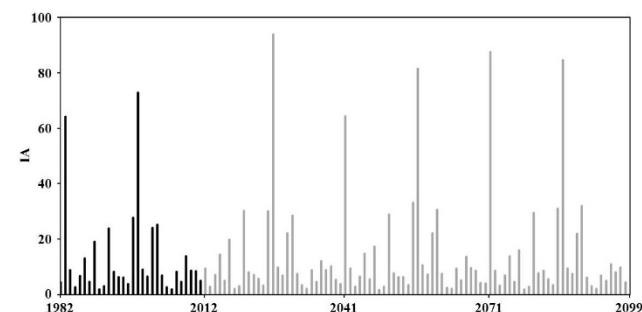


Figura 5. Evolución anual del Índice de Aridez (IA) para el periodo 1982-2011 (negro) y según los datos de la proyección climática del modelo ECHOG en el escenario A2 para el periodo 2012-2099 (gris) en la Povincia de Santa Elena.

Fuente: Los autores.

La evolución anual del IA en 2012-2099 no presenta cambios respecto al periodo histórico 1982-2011, con valores de tendencia próximos a cero para ambos periodos de tiempo (Tabla 3). De esta manera, mientras que en periodos de baja ocurrencia de precipitaciones el clima quedaría clasificado como Desértico hiperárido, en el caso de periodos con eventos de alta precipitación asociados al fenómeno ENOS llega a clasificarse como Perhúmedo (Fig. 5).

A escala mensual, aunque en su mayoría los valores de IA calculados a partir del escenario ECHOG A2 presentan valores similares a los establecidos para el periodo de referencia 1982-2011, durante los meses de la estación de lluvias hay ciertas variaciones en la clasificación climática, a pesar de que los análisis de tendencias no establecen cambios significativos en la evolución de los IA (Tabla 3).

De esta manera, por al aumento que se espera en las precipitaciones para el siglo XXI, entre enero y abril los valores de IA incrementan su valor disminuyendo la aridez de la región, transformándose los valores de enero y abril de Semidesértico árido a Semiárido mediterráneo y de marzo de Semiárido mediterráneo a Subhúmedo, manteniéndose febrero como el mes menos árido con un clima Húmedo.

Por lo tanto, de acuerdo al escenario climático proyectado para la PSE, aunque se espera un mantenimiento de las condiciones climáticas en la región para el siglo XXI con un clima Semidesértico árido, sí se detectan pequeñas variaciones en la dinámica climática intraanual durante el periodo de asociado a la ocurrencia precipitaciones, con un aumento de las lluvias y una disminución de la aridez de la zona entre los meses de enero y abril.

4. Conclusiones

El análisis de la serie climática histórica (1982-2011) de temperatura media y precipitación de la Provincia de Santa Elena permite clasificar a la región según el índice de Aridez de De Martonne como de clima Semidesértico árido, si bien la intensa variabilidad climática intraanual que se da en la zona provoca una variación de climas extremos desde Desierto hiperárido a Húmedo.

La temperatura media y precipitación entre 1982-2011 arrojan tasas de evolución positivas de 0,038 °C/año y 0,196 mm/año, con una heterogénea dinámica mensual. Mientras la temperatura muestra valores positivos de pendiente de 0,017 °C/mes a 0,065 °C/mes, la precipitación presenta tendencias positivas en enero, febrero y abril de 0,22 mm/mes a 0,82 mm/mes, tendencias negativas en diciembre y marzo de -0,02 mm/mes y -0,75 mm/mes y tendencias de cero los meses restantes.

Los modelos y escenarios climáticos muestran una amplia posibilidad de evoluciones climáticas, si bien adaptados a las condiciones locales de los datos históricos de la Provincia de Santa Elena, permite determinar el modelo ECHOG en su escenario A2 como el más adecuado para la ejecución de proyecciones climáticas.

Los resultados de la proyección climática (2011-2099) del escenario ECHOG A2 arroja incrementos anuales en la temperatura media de +2,7 °C y de la precipitación del +8,2%, y si bien la variabilidad de los valores de temperatura se mantienen durante el siglo XXI, en el caso de la

precipitación ocurre un aumento de los valores máximos de precipitación anual.

Los análisis de tendencia arrojan tasas de evolución mensual positivas para la temperatura y la precipitación siguiendo un comportamiento parecido al de la serie histórica de 1982-2011. No obstante los resultados son más acertados para la temperatura, al resultar un parámetro menos complejo de cálculo en las proyecciones climáticas.

A pesar de la evolución climática que está ocurriendo en la Provincia de Santa Elena, el Índice de Aridez de De Martone no manifiesta cambios anuales para los periodos 2012-2040, 2041-2070 y 2071-2099 al mantenerse un clima Semidesértico árido. Sin embargo, a escala mensual, la mayor ocurrencia de precipitaciones durante los meses de la estación lluviosa de enero a abril, motivará la reducción del grado de aridez de la región y el paso de un clima Semidesértico árido a Semiárido mediterráneo y de Semiárido mediterráneo a Subhúmedo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto PROMETEO de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación – SENESCYT. Agradecer al Ing. Raúl Mejía del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI y al Suboficial Henry Gálvez del Instituto Oceanográfico de la Armada – INOCAR por la información facilitada para este trabajo.

Bibliografía

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC. 2007.
- [2] IPCC. Climate change and water. Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [3] Rosenblüth, N., Fuenzalida, H.A. and Aceituno, P., Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, pp. 67-85, 1997.
- [4] Mark, B.G. and Seltzer, G.O., Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24, pp. 2265-2280, 2005.
- [5] Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G. and Bradley, R.S., Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89, pp. 79-96, 2008.
- [6] Falvey, M. and Garreaud, R.D., Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102, 2009. DOI: 10.1029/2008JD010519
- [7] Seiler, C., Hutjes, R.W.A. and Kabat, P., Climate variability and trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, pp. 130-146, 2013.
- [8] Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M. and Keimig, F., 20th Century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change*, 59, pp. 75-99, 2013.
- [9] Marengo, J.A., Rusticucci, M., Penalba, O. and Renom, M., An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98, pp. 509-529. 2010. DOI: 10.1007/s10584-009-9743-7
- [10] Carmona, A.M. and Poveda, G., Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123, pp. 301-313, 2014. DOI:

- 10.1007/s10584-013-1046-3
- [11] Pinilla, M.C. y Pinzón, C., Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RClimate, en la parte central del departamento de Santander, Colombia. 8 Congreso Internacional Asociación Española de Climatología. Cambio climático. Extremos e impactos. Salamanca, España, 2012.
- [12] Celleri, R., Willem, P., Buytaert, W. and Feyen, J., Space-time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21, pp. 3316-3327, 2007.
- [13] Lavado-Casimiro, W.S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J.C. and Guyot, J.L., Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*, 27, pp. 2944-2957, 2012.
- [14] Pizarro-Tapia, R., Cabrera-Jofre, C., Morales-Calderón, C. and Flores-Villanelo, J.P., Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciar en la producción de agua (1963-2006). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2, pp. 5-19, 2011.
- [15] Souvignet, M., Oyarzún, R., Verbist, K.M.J., Gaese, H. and Heinrich, J., Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29-32°S): Water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, 57(3), pp. 479-495, 2012. DOI: 10.1080/02626667.2012.665607
- [16] Hurtado-Montoya, A.F. and Mesa-Sánchez, O.J., Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *DYNA*, 81(186), pp. 251-258, 2014.
- [17] Vicente-Serrano, S.M. and Cuadrat-Prats, J.M., Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro Valley (NE of the Iberian Peninsula) during the second half of the twentieth century. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, pp. 247-258, 2007.
- [18] Gonzalez-Hidalgo, J.C., Brunetti, N. and Luis, M., A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *International Journal of Climatology*, 31, pp. 715-731, 2011.
- [19] García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahao, R. and Merchán, D., Impact of climate change on Mediterranean irrigation demand: Historical dynamics of climate and future projections. *Water Resource Management*, 28, pp. 1449-1462, 2014.
- [20] Strub, P.T., Mesías, J.M., Montecino, V., Rutllant, J. and Salinas, S., Coastal ocean circulation off western South America coastal segment. *The Sea* (Chapter 10). John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [21] Thiel, et al., The Humboldt current system of northern and central Chile oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 45, pp. 195-344, 2007.
- [22] Montecino, V. and Lange, C.B., The Humboldt current system: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. *Progress in Oceanography*, 83, pp. 65-79, 2009.
- [23] Cañas, L., El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. Banco Central del Ecuador, 1983.
- [24] Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A., Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp. 1633-1644, 2007. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007.
- [25] Recalde-Coronel, G.C., Barnston, A.G. and Muñoz, A.G., Predictability of December-April rainfall in coastal and Andean Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, pp. 1471-1493, 2014.
- [26] García-Garizábal, I. and Romero, P., Homogeneous temperature series for thermal characterization and detection of trends in the Province of Santa Elena, Ecuador. *International Journal of Climatology*, 36(8), pp. 3129-3138, 2016. DOI: 10.1002/joc.4541
- [27] García-Garizábal, I., Rainfall variability and trend detection in coastal arid Ecuador. *International Journal of Climatology*. 2013. Under review.
- [28] De Martonne, E., Aréisme et índice artidite. *Compte Rendus de L'Acad.*, París, 182, pp. 1395-1398, 1926.
- [29] Mann, H.B., Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, pp. 245-259, 1945.
- [30] Kendall, M.G., Rank correlation method. Griffin, London, 1975.
- [31] Sen, P.K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, pp. 1379-1389, 1968.
- [32] Moratiel, R., Durán, J.M. and Snyder, R.L., Responses of reference evapotranspiration to changes in atmospheric humidity and air temperature in Spain. *Climate Research*, 44, pp. 27-40, 2010.
- [33] Milly, P.C.D., Dunne, K.A. and Vecchia, A.V., Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, pp. 347-350, 2005. DOI: 10.1038/nature04312
- [34] IPCC-TGICA, General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 2007.
- [35] Errasti, I., Ezcurra, A., Sáenz, J. and Ibarra-Berastegi, G., Validation of IPCC AR4 models over the Iberian Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology*, 103, pp. 61-79, 2011.
- [36] García-Garizábal, I. and Carrillo-Espinoza, C., Global climate models generator, 2016.
- [37] García-Garizábal, I. and Carrillo-Espinoza, C., FuCHSIA: Future climate and hydrological scenarios for environmental management and Assessment, 2016.

I. García-Garizábal, es Lic. en Geología en 2005 y Dr. en Geología en 2010, por la Universidad de Zaragoza, España. Ha trabajado en la evaluación de estudios hidrológicos, gestión de recursos hídricos y cambio climático prestando sus servicios en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (España), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) y como profesional libre. ORCID: 0000-0001-9341-0911

P. Romero, es Ing. de Minas en 2002, por la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador y Dra. en Ingeniería de los Recursos Minerales, Materiales, Energía y Medio Ambiente en 2010 por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Ha trabajado desarrollando estudios hidrogeológicos aplicados a la gestión de recursos hídricos y del medio ambiente, prestando sus servicios en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) y como profesional libre. ORCID: 0000-0002-3751-2662

S. Jiménez, es Ing. de Minas en 2008 por la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador y MSc en Investigación, Modelización y Análisis de Riesgo en Medio Ambiente en 2010, por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Ha trabajado desarrollando estudios hidrogeológicos aplicados a la gestión de recursos hídricos, medio ambiente y gestión minera. Su actividad profesional se ha llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador), Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM, Ecuador) y como profesional libre. ORCID: 0000-0002-3538-6754

L. Jordá, es Ing. de Minas en 1998 y Dr. en 2009 por la Universidad Politécnica de Madrid – UPM, España. Su labor profesional se ha dedicado al desarrollo de estudios geotécnicos y de afección hidrogeológica, prestando sus servicios en empresas como Geoconsult (España), Incosa (Perú), Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador), Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y como profesional libre. ORCID: 0000-0002-2332-5647