

ANÁLISIS DE INUNDACIONES COSTERAS POR PRECIPITACIONES INTENSAS, CAMBIO CLIMÁTICO Y FENÓMENO DE EL NIÑO. CASO DE ESTUDIO: MACHALA^a

COASTAL FLOOD ANALYSIS BY HEAVY RAINFALL, CLIMATE CHANGE AND ENSO. CASE STUDY: MACHALA

Sheila Serrano Vincenti^{1,*}, Andrés Reisancho Puetate¹, Ronnie Lizano Acevedo¹, Mercy J. Borbor-Córdova² y Anna M. Stewart-Ibarra³

¹ Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales GRICAM. Centro de Investigación en Modelamiento Ambiental CIMA-UPS. Carrera de Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana, Av. Morán Valverde s/n y Rumichaca. Campus Sur. Quito, Ecuador.

² Facultad de Ingeniería Marítima. Ciencias Oceánicas y Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Campus Gustavo Galindo. Guayaquil, Ecuador.

³ Latin America Research Program. Center for Global Health & Translational Science. State University of New York SUNY Upstate Medical University. 4100 Institute for Human Performance 505 Irving Ave., Syracuse, NY 13210, USA.

*Autor para correspondencia: sserranov@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 15 de febrero de 2016. Aceptado, tras revisión, el 29 de septiembre de 2016.

^aParte de los resultados de esta investigación se presentaron en el 1er. Congreso de Cambio Climático del Ecuador. Boletín de Resúmenes. Salinas 14-16 abril 2016. ISBN: 978-9942-14-354-9. https://www.researchgate.net/publication/301700552_Boletin_de_resumenes_-_1er_Congreso_Anual_de_Cambio_Climatico_en_el_Ecuador

Resumen

El presente trabajo busca estimar las amenazas de inundación debido a los efectos de las lluvias intensas, cambio climático y el Fenómeno de El Niño (ENSO) sobre la ciudad de Machala, Ecuador. Se han estudiado siete estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), dos de las cuales tenían datos diarios de precipitación y temperatura con series temporales con más de 30 años. Para identificar los índices de cambio climático se utilizó el programa R-climdex, incluyendo los reportes de inundaciones de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos SNGR y el Índice del Fenómeno del Niño ONI. Los resultados muestran que Machala es una ciudad en riesgo ante inundaciones en la que los eventos extremos de precipitación son la principal causa. Presentándose un aumento, tanto en intensidad como en frecuencia, lo cual es congruente con el fenómeno de cambio climático. Además se encontró que los eventos de inundación están relacionados con la aparición de ENSO. En lo que se refiere a la temperatura, se encontró también que los valores altos de temperaturas mínimas están en aumento, una evidencia más de que el cambio climático podría estar afectando a la zona de estudio.

Palabras claves: Machala, cambio climático, R-climdex, ENSO, inundaciones.

Abstract

This paper seeks to estimate the threat of flooding by the effects of heavy rains, climate change and ENSO on the Machala city, Ecuador. Were studied seven weather stations of the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI), two of which had complete daily data of precipitation and temperature with more than 30 years. Climate change indices were identified using R-ClimDex program, comparing flooding reports of the National Secretariat for Risk Management (SNGR) and the ONI Index. The results shown that Machala is a city at risk from flooding in which extreme precipitation events are the main cause, which present increase both in intensity and frequency, which is consistent with the phenomenon of climate change. In addition it was found that flood and intense rain events are related to the occurrence of ENSO (Niño and Niña). Also was found that high values of minimum temperatures are increasing, more evidence that climate change could be affecting the study area.

Keywords: Machala, climate change, R-climdex, ENSO, inundation.

Forma sugerida de citar: Serrano, S., A. Reisancho, R. Lizano, M. J. Borbor-Córdova y A. M. Stewart-Ibarra. 2016. **Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno de El Niño. Caso de estudio: Machala.** La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 24(2):53-68. ISSN: 1390-3799.

1 Introducción

La inundación, vista como amenaza, se refiere al desbordamiento no controlado de masas de agua fuera de sus confines normales; generalmente es ocasionada por la precipitación (lluvia, nieve o granizo), oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica (OMM, 2012). Generalmente las inundaciones afectan a las comunidades ubicadas en zonas bajas, planas, con poca cobertura vegetal y suelos asfálticos que impiden la infiltración de agua. La tala de bosques, fallas en el diseño de las obras hidráulicas y ubicación de centros poblados en las orillas de las masas de agua, agravan este problema (CENAPRED, 2009).

En la zona costera de Ecuador, las inundaciones se originan principalmente por precipitaciones intensas, aunque se puede sumar el efecto de las mareas altas, agujajes e incremento de caudales en ríos o lagos aledaños (generalmente ocasionado por lluvias intensas en las zonas altas); aunque también existen causas antrópicas como: roturas de cañerías u otros problemas de infraestructura (SNGR, 2012). En los casos de ciudades como Guayaquil, Machala y Babahoyo, a estas causas se debe sumar el efecto de una topografía plana, que ocasiona que toda actividad de desagüe sea lenta y poco eficiente (CEPAL-BID, 2000).

1.1 Precipitaciones intensas y cambio climático

Según el Panel Intergubernamental de Expertos frente al Cambio Climático (IPCC, 1996), el Cambio Climático ocasiona un incremento en frecuencia e intensidad de eventos extremos tanto de precipitación (inundaciones, deslizamientos, huracanes y ciclones), como de temperatura (olas de frío y calor) (Riebeek, 2005). En general, estos cambios impactarán en todo tipo de ecosistema y actividades comerciales agrícolas, pecuarias, marinas o turísticas. Específicamente el anegamiento de agua, tendría consecuencias en la salud pública, el aumento en la erosión costera y pérdida de litorales debido al aumento en el nivel del mar, así como a la disminución de las fuentes de agua dulce (UCAR, 2012).

En el Ecuador, se confirma un aumento de temperatura, sequías e inundaciones recurrentes, derretimiento de glaciares y una intensificación y variación de los patrones de precipitación (Muñoz *et al.*,

2010), que involucra las consecuencias ya enunciadas.

Al parecer, el incremento de temperatura generalizado, debido a la acumulación de gases de efecto invernadero hace que exista más vapor de agua disponible en la atmósfera, al ser éste el combustible de las precipitaciones y tormentas, existe más posibilidad de que su acumulación se libere abruptamente a través de eventos extremos de precipitaciones (Serrano *et al.*, 2014). De esta manera, se evidencia que el cambio climático actúa como una especie de “disparador de eventos extremos” sobre todo de lluvia, que son la principal causa de las inundaciones reportadas y el objetivo de este estudio.

1.2 El fenómeno de El Niño y las precipitaciones intensas

El fenómeno de El Niño o ENSO (por sus siglas en inglés, El Niño Southern Oscillation) lleva este nombre debido a que sus efectos por lo general comienzan a manifestarse en las festividades de Navidad. En 1923, Sir Gilbert Thomas Walker describió por primera vez la circulación a gran escala que bautizó como ENSO (Walker, 1923).

ENSO se refiere al fenómeno océano atmosférico climático a gran escala vinculado a los cambios periódicos en los patrones de viento, y a un calentamiento cuasi-periódico de las temperaturas de la superficie marina a través del Océano Pacífico ecuatorial central y Este central. Dentro de ENSO, El Niño representa la fase de calentamiento, correspondiente a pequeña variación de temperatura, superior a $0,5^{\circ}\text{C}$ grados sobre la media móvil de la temperatura superficial del mar (NOAA, 2015b). La gran cantidad de vapor disponible por el incremento de temperatura, genera las condiciones propicias para un incremento de precipitaciones en las costas de América, especialmente de Ecuador y Perú. Sin embargo, cabe indicar, que ENSO comprende también una fase de enfriamiento de la superficie del mar, conocida como La Niña, en la cual se experimenta un descenso de la temperatura de $-0,5^{\circ}\text{C}$ sobre la media móvil. Estas temperaturas bajas, se asocian con un descenso de las precipitaciones, que ocurren inmediatamente después de El Niño.

1.2.1 El índice del Fenómeno del Niño (ONI)

El Oceanic Niño Index (ONI) disponible a través de la web de la NOAA (National Oceanic and Atmosp-

heric Administration), es un indicador de la presencia del Fenómeno del Niño y La Niña. Es un dato mensual que registra las anomalías de temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Central, de coordenadas (5°N–5°S, 120°–170°W), tomando como período base los años 1971 a 2000, generadas del ERSST (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature), que es una base de datos, generada también por la NOAA, que utiliza datos in situ, y satelitales; cuyos valores faltantes son rellenados estadísticamente. ONI, indica la presencia de El Niño cuando se registran más de 5 meses consecutivos con un valor superior a +0,5°C, y de La Niña, cuando estas anomalías se mantienen 5 meses consecutivos por debajo de los -0,5°C (NOAA, 2015).

1.2.2 El Niño en Machala

La presencia del fenómeno El Niño en los años de 1997-1998 registró los eventos de lluvias e inundaciones históricas más intensos. Durando más de 19 meses consecutivos, fue también el evento con mayor cantidad de información recopilada: en enero de 1997 se dio un incremento progresivo de ONI de 1°C hasta alcanzar el récord histórico de 4,72°C en el mes de julio de 1998. En cuanto a precipitaciones, los valores para Machala de precipitación acumulada durante El Niño, fueron de 2991.90 mm cuando la precipitación acumulada en el periodo de 1964 a 19987 fue de 2020 mm (CAF, 2000) representando un 148% más, en otras palabras, en 19 meses llovió más que en 34 años.

Las consecuencias económicas y sociales fueron enormes, según Subía (2002), se registró una interrupción casi total de las vías de comunicación, con el aislamiento de poblaciones por semanas seguidas, aplazamiento temporal o definitivo de planes y programas del sector público y privado. En la presencia de El Niño se perdieron vidas humanas y miles de hectáreas de sembríos, puentes y caminos vecinales, los centros poblados se inundaron afectando en general a los negocios y a la pequeña industria, deteriorando calles y servicios básicos por la presencia excesiva de agua, consecuentemente la proliferación de enfermedades como la malaria, paludismo, dengue, afecciones a la piel, etc., causadas por la falta de evacuación del el agua concentrada en los centros poblados.

2 Materiales y métodos

2.1 Reportes de inundaciones de la SNGR

La Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador (SNGR) ha generado un reporte de inundaciones tomado desde el año 2007 hasta el 2012. En este tipo de reporte se indica la fecha en la que se generó la inundación y detalles de las causas de este fenómeno, tal como se presenta en la Tabla 1. De los 29 eventos de inundación solo 2 no fueron causados por lluvias, estos fueron causados por rotura de cañería en la parroquia de Puerto Bolívar y la segunda se presentó en la parroquia El Retiro la cual no es de origen meteorológico, no determinado.

2.2 Estaciones meteorológicas utilizadas

Los datos meteorológicos fueron entregados por el INAMHI y a la Universidad Estatal de Machala UEM (estación Granja Santa Inés), previo un control de calidad y homogenización. Debido a la fina localización temporal (horas o minutos) y espacial (decenas de kilómetros cuadrados), que los eventos extremos suelen tener, es requisito contar con una resolución mínima diaria de los datos. Por otro lado, para realizar un estudio de cambios en la climatología se requiere un rango temporal mínimo de 30 años. De esta manera, los datos de las estaciones estudiadas se presentan en la Tabla 2.

A través de entrevistas y reuniones con los grupos focales, se ha mencionado el saber vernáculo de la zona que indica que “cuando llueve en Cuenca, se inunda Machala”, es decir que las lluvias que ocurren en la zona andina aledaña, cercana a la ciudad de Cuenca, afectan finalmente a los procesos de inundación en la zona costera de Machala, y es por esto que se incluyen en el estudio estaciones meteorológicas que están alejadas de la ciudad, tal como se aprecia en la Figura 1.

Cabe resaltar, como una limitación de este estudio, la poca cantidad de estaciones con datos meteorológicos diarios en los alrededores de la ciudad de Machala. Pero en Ecuador ésta es la información disponible.

2.3 R-Climdex e índices de cambio climático

Se estudian los índices de cambio climático recomendados por el Grupo de Expertos de Índices y Detección de Cambio Climático (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) ETCCDI del IPC (Sillmann, 2013a,b), los cuales requieren datos tanto de temperatura como de precipitación diarios con un rango superior a 30 años. Las dos únicas estaciones que contaban con estos datos fueron Saraguro (INAMHI) y Santa Inés (UEM), para obtener

los indicadores de temperatura sólo se pudo utilizar los datos de la estación de Santa Inés ya que Saraguro se tenía demasiados datos incompletos de temperatura ($\leq 70\%$). El análisis se llevó a cabo con la herramienta computacional R-Climdex, (en lenguaje R). Desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Center (NCDC) de la NOAA y programa recomendado por el IPCC desde el 2001 (Zhang *et al.*, 2004). Este es un programa de código abierto que no depende de un sistema operativo determinado (Santos, 2004).

| PARROQUIA | FECHA | HORA | CAUSAS |
|--------------------------|-------------------|----------------|---|
| Machala | 05/01/2007 | 0:00:00 | Lluvia pertinaz |
| El Retiro | 08/01/2007 | 8:00:00 | Lluvia |
| Puerto Bolivar | 06/07/2007 | 5:00:00 | Rotura tubería |
| Machala | 29/02/2008 | 23:00:00 | Lluvia intensa y colapso de alcantarillado |
| Machala | 07/03/2008 | 19:30:00 | Lluvia intensa y colapso de alcantarillado |
| La Providencia | 07/03/2008 | 19:30:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| Machala | 07/03/2008 | 19:30:00 | Fuerte lluvia y drenaje tapado |
| La Providencia | 07/03/2008 | 19:30:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| Machala y La Providencia | 07/03/2008 | 19:30:00 | Lluvia intensa y colapso de alcantarillado |
| Machala | 07/03/2008 | 19:30:00 | Fuerte lluvia y drenaje tapado |
| La Providencia | 07/03/2008 | 19:30:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| Machala | 03/07/2008 | 19:30:00 | Fuerte lluvia y colapso de alcantarillado |
| La Providencia | 03/07/2008 | 19:30:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| Machala | 03/07/2008 | 19:30:00 | Fuerte lluvia y drenaje tapado |
| La Providencia | 03/07/2008 | 19:30:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| El Retiro | 12/01/2009 | 2:30:00 | Colapso de alcantarillado |
| El Retiro | 12/01/2009 | 2:30:00 | Colapso de alcantarillado |
| Machala | 05/02/2009 | 17:35:00 | Fuertes lluvias y desbordamiento de canales |
| El Retiro | 01/12/2009 | 2:30:00 | Causa no fue de origen meteorológico |
| Machala | 21/01/2011 | 9:40:00 | Lluvia pertinaz |
| Machala | 27/01/2011 | 5:00:00 | Fuerte lluvia |
| Machala | 13/02/2011 | 10:30:00 | Lluvia de mediana intensidad |
| Nueve de Mayo | 19/04/2012 | 6:00:00 | Intensa lluvia |
| Machala | 19/04/2012 | 6:00:00 | Intensa lluvia |

Tabla 1. Reportes de inundación de la SNGR ocurridos en Machala del 2007 al 2012. Tomado de (SNGR, 2012).

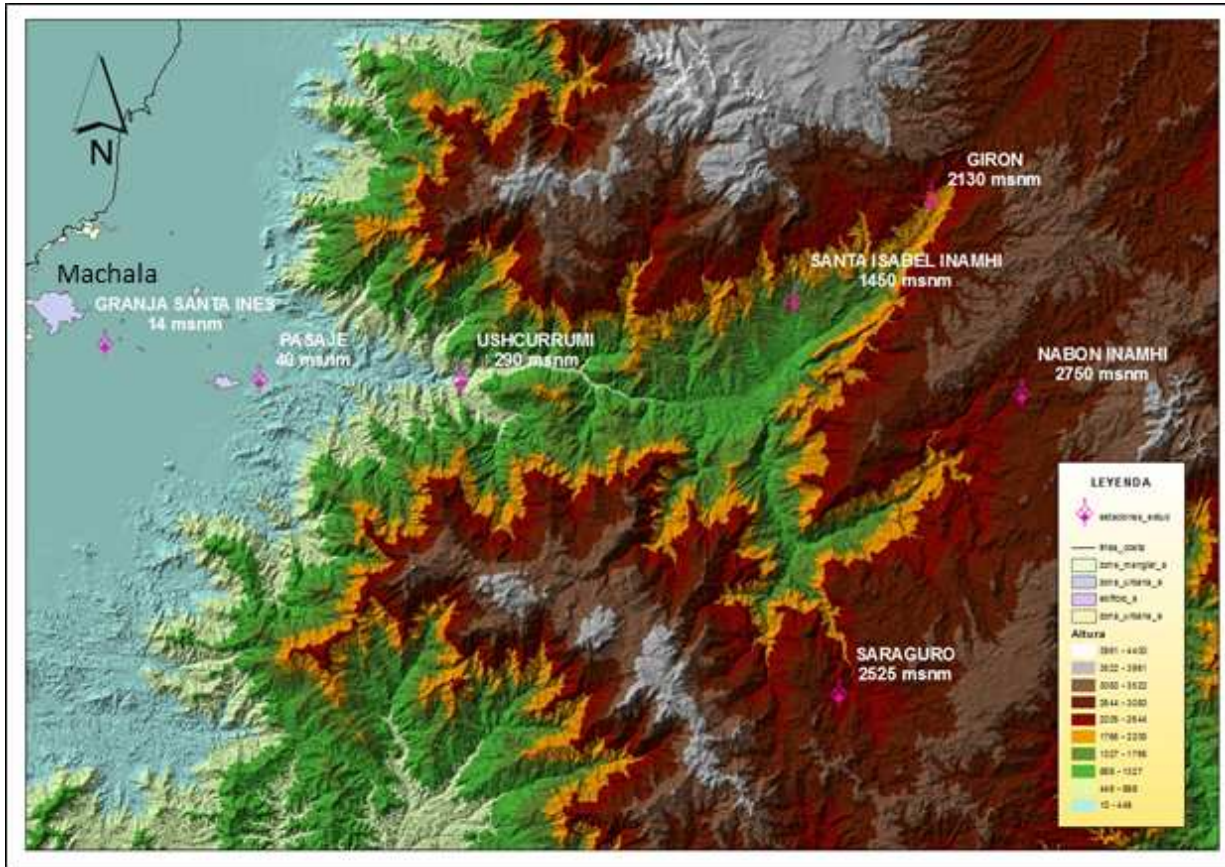


Figura 1. Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas, la ciudad de Machala está resaltada en color violeta. Adaptado de: Instituto Geográfico Militar.

| NOMBRE | CÓDIGO INAMHI | LATITUD | LONGITUD | ALTURA (m.s.n.m) | VARIABLE | PERÍODO |
|--------------------|---------------|--------------|---------------|------------------|----------|-----------|
| PASAJE | M0040 | 3G 19' 19" S | 79G 46' 8" W | 40 | P | 1980-2013 |
| USHCURRUMI | M0481 | 3G 19' 16" S | 79G 35' 0" W | 290 | P | 1980-2013 |
| STA. ISABEL INAMHI | M0032 | 3G 14' 51" S | 79G 16' 36" W | 1450 | P | 1980-2013 |
| GIRON | M0419 | 3G 9' 14" S | 79G 8' 58" W | 2130 | P | 1980-2013 |
| SARAGURO | M0142 | 3G 36' 43" S | 79G 14' 2" W | 2525 | P,T | 1980-2013 |
| NABON-INAMHI | M0420 | 3G 20' 2" S | 79G 3' 58" W | 2750 | P | 1980-2013 |
| GRANJA STA. INÉS | — | 3G 17' 16" S | 79G 54' 5" W | 14 | P,T | 1980-2013 |

Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. En las variables de estudio P, se refiere a precipitación y T a las temperaturas máximas y mínimas diarias.

Según el ETCCDI, existen 24 índices de cambio climático, que incluyen la detección de eventos de temperaturas extremas, olas de calor y de frío; incremento o disminución en intensidad y frecuencia de lluvia y lluvias intensas (Zhang *et al.*, 2004). Sin embargo, dadas las características de la zona de estudio y de los datos disponibles, sólo se encontraron los siguientes índices que lograron una significancia estadística:

Días Húmedos Consecutivos (CWD por sus siglas en inglés Consecutive Wet Days). Que determina la longitud máxima de un período lluvioso, contando el número de días consecutivos en donde se registra precipitación. Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación registrada en un día i , en el período j , se determina el mayor número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm.} \quad (1)$$

Para este estudio se utilizó como período de estudio anual, siendo j el indicador del año. Así mismo se definió como día con lluvia, a aquél que registró una precipitación diaria acumulada igual o superior a 1 mm, definición compatible con la sensibilidad mayoría de pluviómetros utilizados (Sillmann, 2013).

Precipitación Total Anual en los Días Húmedos (PRCPTOT), se refiere a la cantidad de lluvia en milímetros registrados en los días lluviosos, durante un año j .

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^j RR_{ij} \quad (2)$$

Cantidad máxima de precipitación en un día RX1day, donde RR_{ij} es la lluvia máxima registrada en el día i , y el año j , así se tiene,

$$RX1day_j = \max(RR_{ij}) \quad (3)$$

RX5day. Asimismo, se evaluó a RX5day, que se refiere a la cantidad máxima de precipitación registrada en un período de cinco días consecutivos de lluvia, $k = 5$. Donde,

$$RX5day = \max(RR_{kj}) \quad (4)$$

SU25. En cuanto a los índices de temperatura, se puede mencionar al SU25, también conocido por “días de verano al año”, que cuenta el número de días en donde la temperatura máxima diaria TX , es superior a los 25°C; de allí el

nombre del índice (SU25, por summer days), así:

$$TX_{ij} > 25^\circ\text{C}, \quad (5)$$

donde TX_{ij} se refiere a la temperatura máxima registrada en el día i , y el año j .

Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria TNn, que registra el valor más bajo, en °C, de las temperaturas mínimas diarias TN_i , en el mes k , durante el año j ,

$$TNn_{kj} = \min(TNn_{kj}). \quad (6)$$

TXx. Finalmente, se determinó el valor mensual máximo de temperatura máxima diaria TXx , que registra el valor más alto, en °C, de las temperaturas máximas diarias TX_i , en el mes k , durante el año j :

$$TXx_{kj} = \max(TXx_{kj}). \quad (7)$$

R-Climdex, realiza un nuevo control de calidad sobre los datos entregados, y evalúa la evolución temporal de los índices mencionados, determinando la media móvil, su tendencia lineal utilizando el método de ajuste de los mínimos cuadrados y una prueba T de significancia estadística, que en varios estudios climáticos se considera suficientemente buena si supera el 80% ($p \leq 0.2$) (Zhang *et al.*, 2004).

3 Resultados y discusión

3.1 Características de las zonas de estudio

Al estar las estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes zonas climáticas, se realizó un breve resumen de los principales estadísticos al analizar el número de días lluviosos, máximos y mínimos presentados así como los correspondientes percentiles (Ver Tabla 3).

En la Tabla 3, se aprecia que el porcentaje de días lluviosos e intensidad de lluvias intensas es prácticamente mayor en la zona costera, descendiendo moderadamente en la sierra. Sin embargo, es más notable la gran diferencia que existe entre los valores máximos detectados y el percentil 99 registrado. Esta gran diferencia es muestra de lo poco representativos que son los eventos extremos de una zona de estudio.

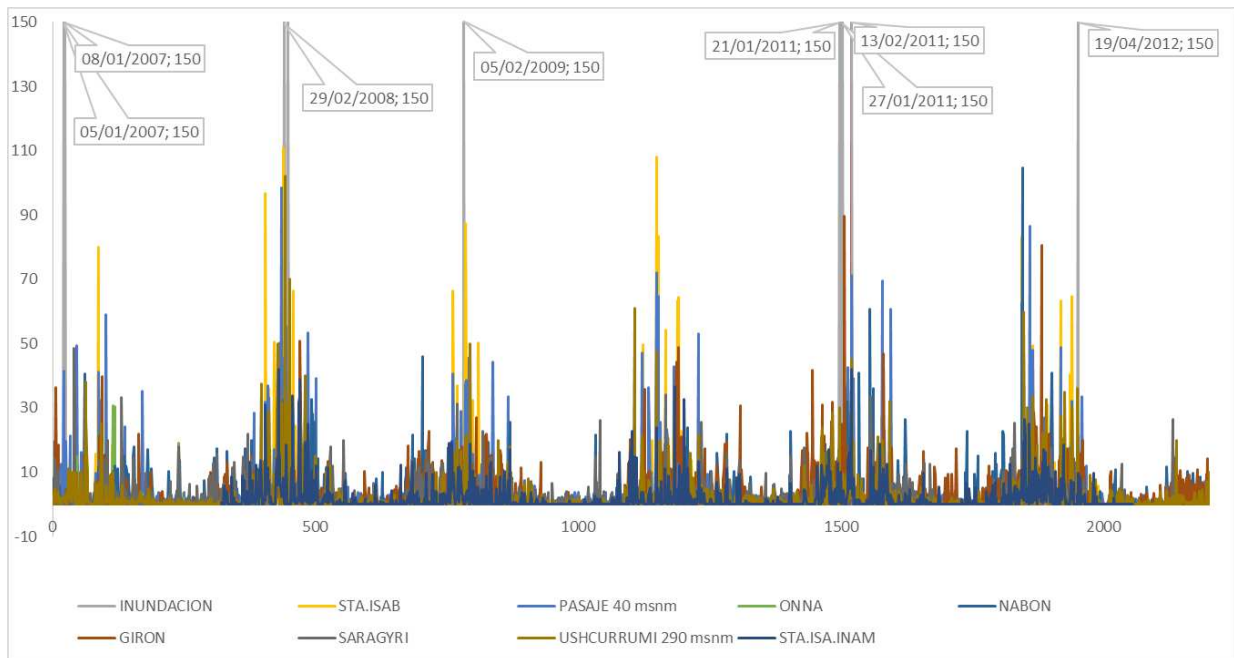


Figura 2. Eventos de inundación reportados por la SNGR y eventos de precipitación diaria para todas las estaciones estudiadas.

| PERCENTILES | PASAJE 40 m.s.n.m. | USHCURRUMI 290 m.s.n.m. | STA. ISABEL 1450 m.s.n.m. | GIRON 2130 m.s.n.m. | SARAGURO 2525 m.s.n.m. | NABON 2750 m.s.n.m. |
|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| P90 [mm] | 5,1 | 5,2 | 6,1 | 10,6 | 7,28 | 8,13 |
| P95 [mm] | 11,6 | 10 | 10,2 | 14,2 | 11,89 | 11,815 |
| P99 [mm] | 44,164 | 30 | 19,13 | 25,992 | 20,98 | 22,6 |
| Valor Máx [mm] | 98,4 | 102 | 42 | 89,6 | 48,6 | 104,8 |
| % Días lluvia | 68% | 49% | 45% | 39% | 57% | 40% |

Tabla 3. Estadísticos principales de las estaciones estudiadas.

3.2 Influencia de las lluvias sobre los procesos de inundación

Al analizar la cantidad de lluvia que se ha generado en cada estación meteorológica estudiada de la Tabla 1, incluyendo los procesos de inundación se obtiene en la Figura 2.

En la Figura 2, se aprecia la gran influencia de los eventos extremos de precipitación sobre los procesos de inundaciones. Mismos que se dan con un

periodo que oscila entre los 300 y 400 días, es decir que prácticamente las inundaciones se dan de manera anual, de preferencia en los meses de enero, febrero, con ligeros desfases hacia diciembre y marzo, y escasamente, abril.

Asimismo, cabe indicar que los eventos de precipitaciones intensas se dan alrededor de las mismas fechas, sin importar si las estaciones se ubicaban en la zona costera o la andina.

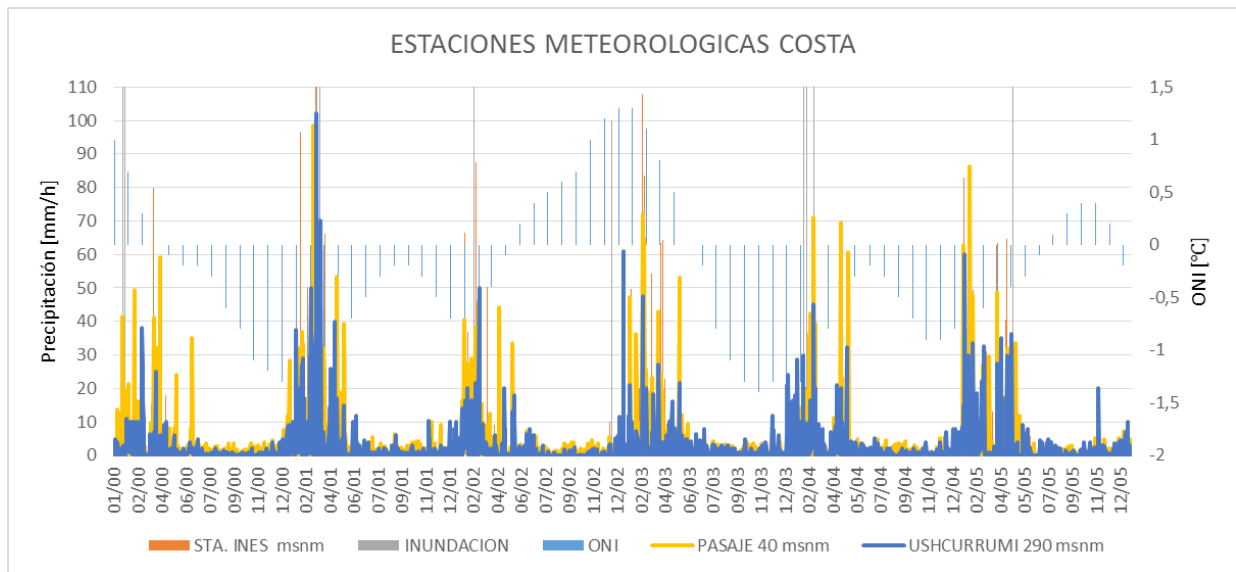


Figura 3. Valores de precipitaciones vs. ONI de las estaciones Granja Santa Ines, Pasaje y Ushcurrumi; pertenecientes a la zona costa del área de estudio.

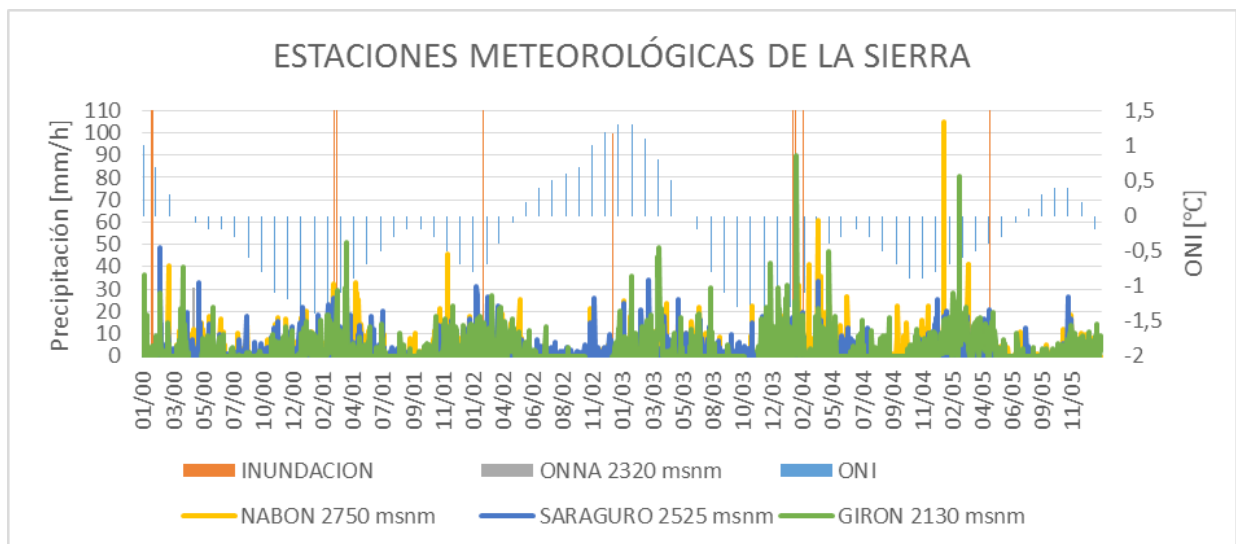


Figura 4. Valores de precipitaciones vs. ONI de las estaciones Girón, Onna, Saraguro, y Nabon; pertenecientes a la zona sierra del área de estudio.

3.3 Influencia de la precipitación en los procesos de inundación bajo la influencia de ENSO por zona de estudio

En la Figura 3 se logra visualizar la relación que existe entre los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas ubicados en la región costa,

los reportes de inundación y el ONI. En este caso, al ser ONI un dato mensual de temperatura superficial del mar, contrastado con los datos diarios de precipitación, se ubicó su valor, en el día 15 de cada mes.

En la Figura 4 se observa la relación existente entre la precipitación registrada en las estaciones de la

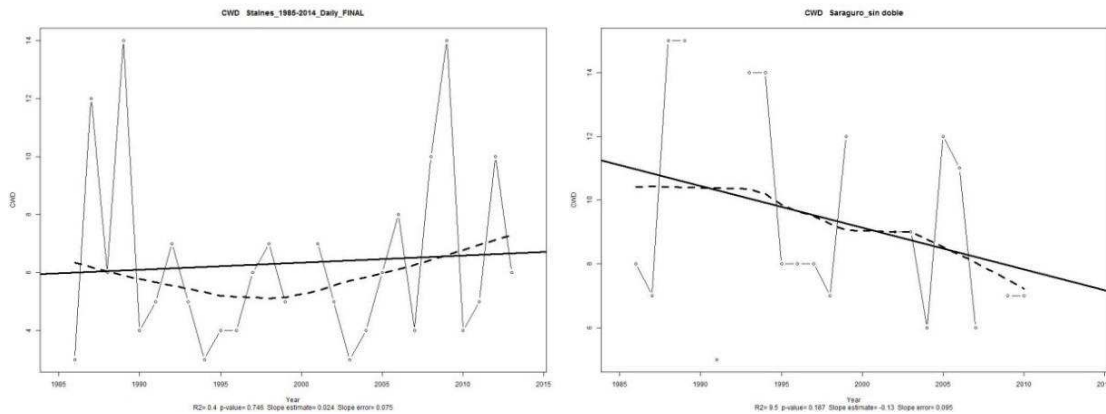


Figura 5. Días húmedos consecutivos CWDs para las estaciones de *Izquierda:* Santa Inés y *Derecha:* Saraguro. La información inferior indica las pendientes de cada gráfica, sus errores y el valor-p.

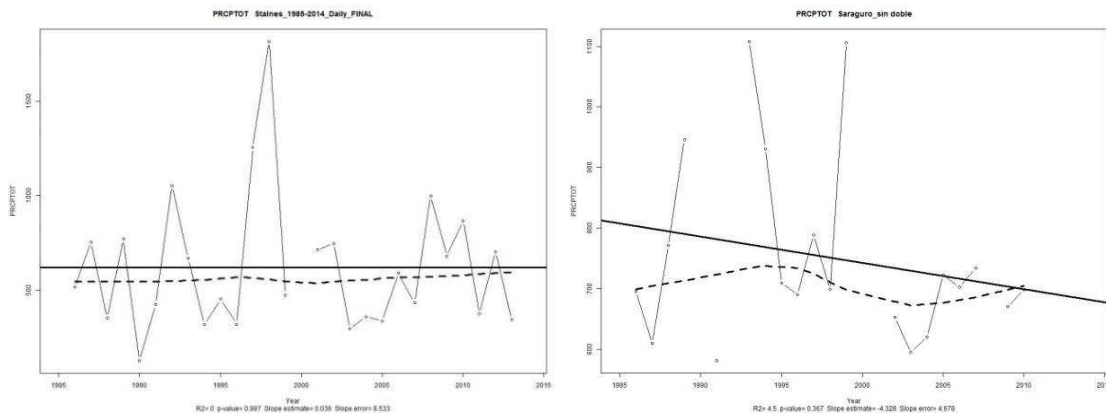


Figura 6. Precipitación total anual en los días húmedos PRCPTOT para las estaciones de *Izquierda:* Santa Inés y *Derecha:* Saraguro. La información inferior indica las pendientes de cada gráfica, sus errores y el valor-p.

región Sierra con ONI, y los reportes de inundación.

Es claro que en ambas figuras se muestra una correspondencia entre los procesos de inundación y la presencia de ENSO. Lo interesante es que no solo se da en presencia de El Niño, sino también de La Niña, que generalmente se asocia con una época de sequía.

3.4 Índices de cambio climático

Como se mencionó anteriormente, se presentan los índices cuya significancia estadística, después de realizar una prueba F, fue lo suficientemente alta. Asimismo, se dividió el estudio de los índices, entre

aquellos relacionados con los procesos de inundación, y aquellos relacionados con el incremento de temperatura.

3.4.1 Índices de lluvia e inundaciones

En la Figura 5, se presenta el Número de Días Húmedos Consecutivos (CWD). La estación Santa Inés presentó un valor de pendiente positiva 0.024(0.075)días/año, pero poco significativa (valor-p de 0.746), la gran desviación se debe a que se tienen dos picos, cuyos valores máximos se presentaron en los años 1989 y 2009, ambos con 14 días consecutivos de lluvia. Mientras que en la estación

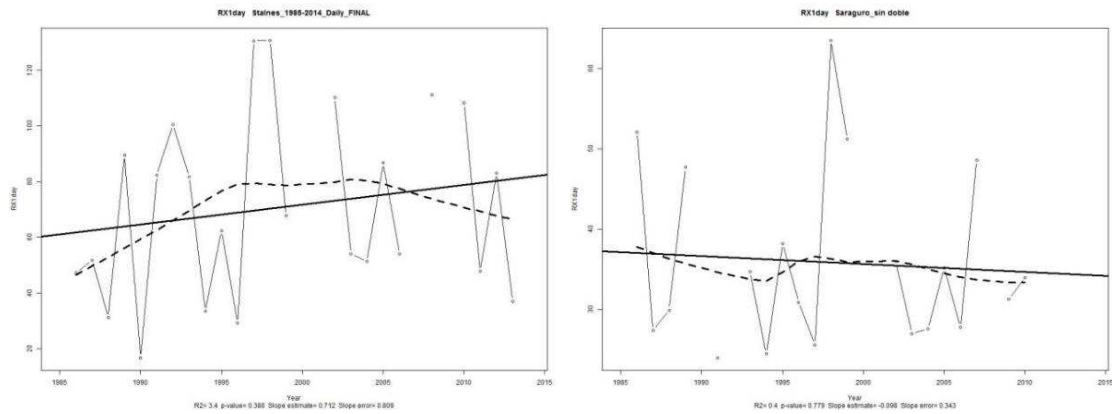


Figura 7. Cantidad Máxima de precipitación en 1 día RX1day para las estaciones de *Izquierda*: Santa Inés y *Derecha*: Saraguro. La información inferior indica las pendientes de cada gráfica, sus errores y el valor-p.

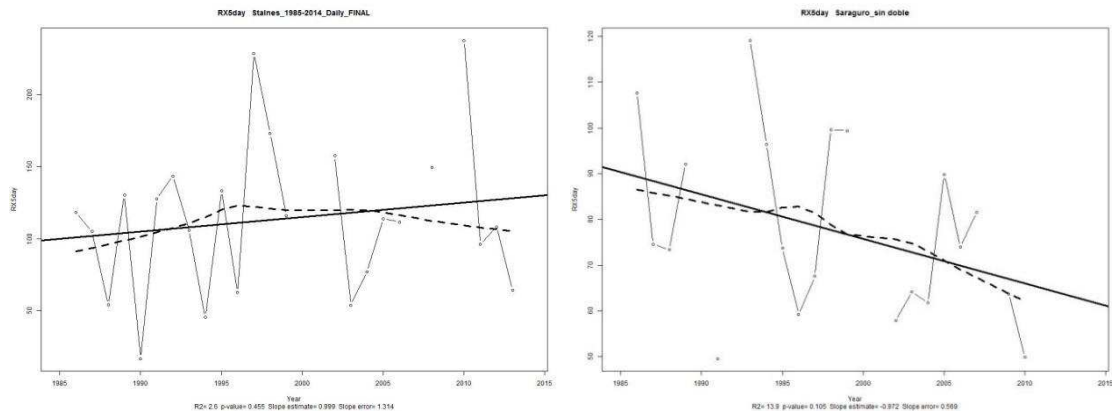


Figura 8. Cantidad Máxima de precipitación en 5 días RX5day para las estaciones de *Izquierda*: Santa Inés y *Derecha*: Saraguro. La información inferior indica las pendientes de cada gráfica, sus errores y el valor-p.

Saraguro presenta una pendiente negativa estadísticamente significativa (valor-p de 0.187) e igual a $-0,13(0,095)$ [días/año]. Registrando sus valores máximos fueron en los años 1988 y 1989 con un valor de 15 CWD. Estas tendencias muestran cómo en la región de la sierra se evidencia no sólo regímenes lluviosos diferentes a los de la costa, sino que en disminución.

En la Figura 6, se visualiza la precipitación total anual en los días húmedos o con lluvia (PRCPTOT). En la estación Santa Inés se presenta una ligera pendiente positiva ($+0,036$ mm/año), pero con una baja significancia estadística (valor $p=0,997$). Esto se debe a que se presenta un valor extremo

de 1816.2 mm/año, en 1998, ocasionado por la presencia del Fenómeno del Niño. Por otro lado, la estación Saraguro presenta una pendiente negativa ($-4,328$ mm/año), con una significancia de $p=0,367$ que indica que tampoco es lo suficientemente significativa. La estación Saraguro presentó dos valores pico los cuales se registraron en los años de 1993 y 1999 con valores de 1107.6 y 1105.9 mm/año respectivamente. Este último valor es interesante ya que existen reportes (Campozano *et al.*, 2014) de que en casos de ENSO muy intenso la región Sierra también se ve afectada.

En las Figura 6 y 7, se presentan datos de la cantidad máxima de precipitación registrada en un día

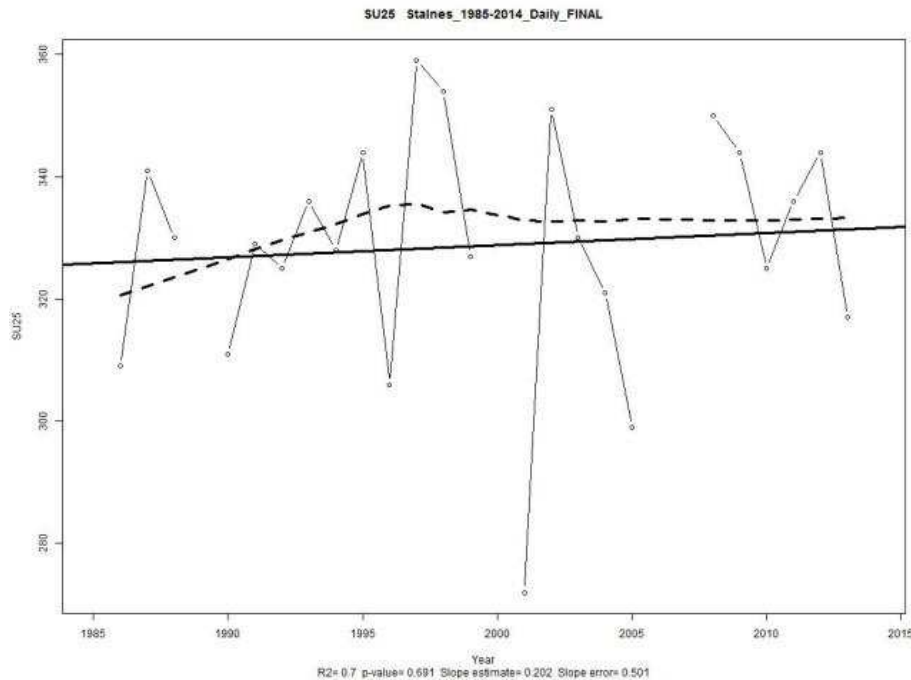


Figura 9. Días de Verano SU25, para las estaciones Santa Inés. La información inferior indica las pendientes de cada gráfico, sus errores y el valor-p.

RX1day, de cada año. Indicador importante de los eventos de inundaciones; ya que según los reportes de la SNGR, las inundaciones se producen por precipitaciones que difícilmente superan las 24 horas de duración (SNGR, 2012). En la estación Santa Inés se tiene una tendencia positiva de 0,712 [mm/año] con un valor-p de 0,388. Por otro lado la cantidad máxima de precipitación en cinco días RX5day tiene un valor de 0,999 [mm/año] con un valor-p de 0,455. Cabe indicar que aunque en ambos casos la tendencia no es suficientemente significativa, este comportamiento se debe a la presencia de ENSO, evento que provoca una enorme variabilidad en el sistema, pero que no se puede eliminar del mismo. Finalmente, la variabilidad e impredecibilidad del sistema climático es una realidad que estará presente en los cálculos.

Otra observación se refiere a que la diferencia entre los valores de RX1day, RX5day y CWD, en el sentido de que las lluvias que ocurren a días consecutivos no son una característica este sistema y que tampoco presentan ninguna tendencia que pueda ser mencionada. Es decir, que la mayoría de eventos

extremos en las zonas de estudio tienen una duración inferior a un día.

A estudiar la estación Saraguro se nota una variación entre los valores de RX1day con una tendencia de $-0,098$ [mm/año] con un valor-p de 0,799 y el RX5day con un valor de $-0,972$ [mm/año] con un valor-p de 0,105*, la primera tendencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.2$), lo que nos indica una disminución a futuro de días consecutivos de lluvia en la región Sierra; en contraste a lo que ocurre en la Costa.

3.4.2 Índices de temperatura

En estos indicadores, debido a la falta de datos de temperatura en la estación de Saraguro, sólo se analizaron los indicadores de la estación de Santa Inés. En la Figura 9, se presentan los días de verano al año (aquellos en los que la temperatura es superior a los 25°C). Obteniéndose un pico de 359 y un valor mínimo de 272 [día/año] en los años de 1997 y 2001 respectivamente.

El valor especialmente bajo del año 2001, genera nuevamente una baja en la significancia estadística

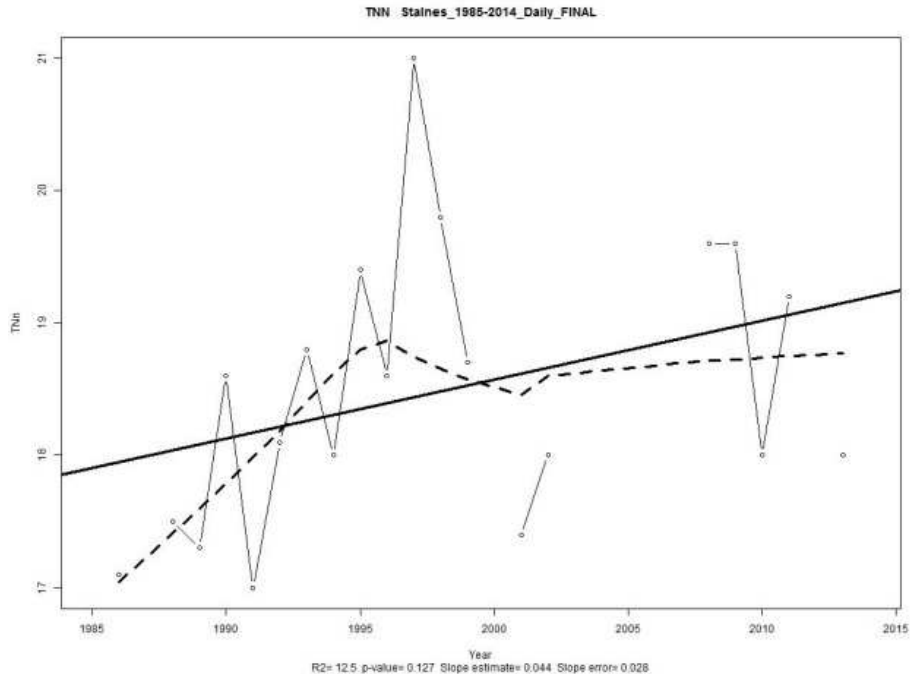


Figura 10. Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria TNn para las estaciones Santa Inés. La tabla información indica las pendientes de cada gráfico, sus errores y el valor-p.

de la tendencia lineal de 0,202 días/año, de tan solo $p=0,69$. Sin embargo, cabe notar que la mayoría de valores de días con temperaturas máximas superiores a 25°C , superan los 320 días al año, lo que equivale a decir que corresponden a más del 87% de los días.

En la Figura 10, se muestra un incremento en el valor de las temperaturas mínimas $0,044^{\circ}\text{C/año}$, con un valor-p de 0,127 que indica una tendencia significativa estadísticamente.

Este indicador es una muestra de que las temperaturas mínimas (generalmente dadas en las primeras horas de la madrugada) se encuentran en aumento, este fenómeno es congruente tanto con los efectos del Cambio Climático (provocado por el incremento de temperatura de la superficie del mar adyacente) como en el Efecto de Isla de Calor, producido por el proceso de urbanización, que se ha intensificado en los últimos años en la ciudad de Machala (Mendoza, 2014).

Finalmente, en la Figura 11, se presenta el comportamiento de los valores anuales máximos de temperatura máxima diaria, se aprecia una tendencia de $-0,004^{\circ}\text{C/año}$ sin significancia estadística

($p=0,868$), misma que se ve afectada por la presencia de ENSO; sin embargo, a pesar de que no existe una tendencia de incremento o decremento, se aprecian una ubicación del promedio de temperatura máxima alrededor de los 34°C ; estas temperaturas son bastante elevadas inclusive para ciudades que se ubican en la región costa.

4 Conclusiones

En primer lugar, los resultados muestran una relación directa entre los eventos de inundación reportados por la SNGR y los eventos extremos de lluvia, ubicados en la costa y en la región Sierra, a pesar de la distancia que se encuentra entre las estaciones estudiadas, apreciándose que tanto los eventos locales como los que se encuentran río arriba, son capaces de afectar por procesos de inundación a la ciudad de Machala.

De la misma manera, se aprecia una influencia de la presencia del Fenómeno del Niño y de La Niña, que no se esperaba. Es decir, no sólo la presencia del Niño produce eventos de inundación, sino que

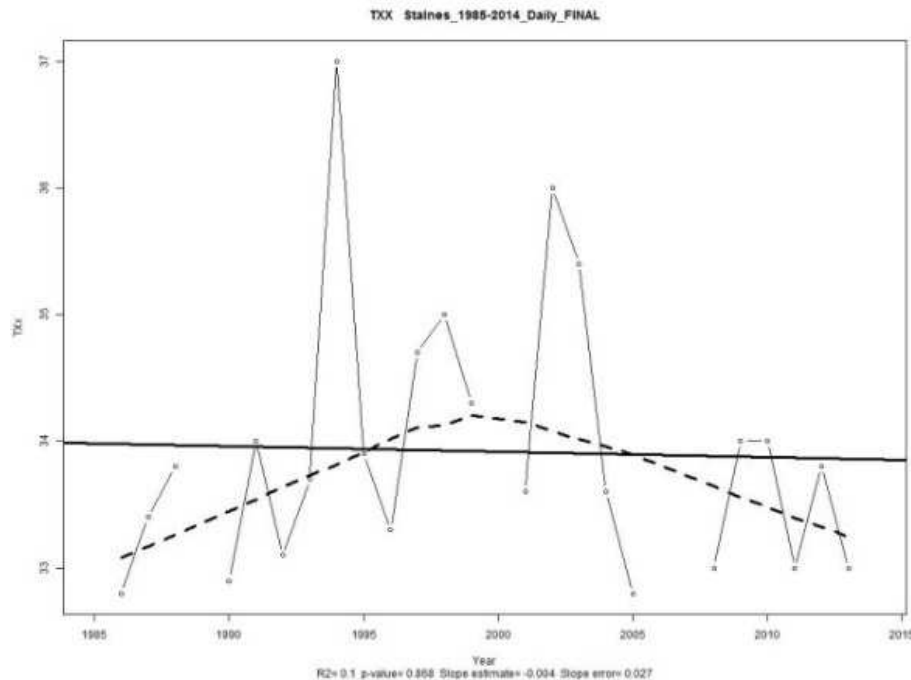


Figura 11. Valor Máximo de las Temperaturas Máximas TXx de Santa Inés. La información inferior indica las pendientes de cada gráfico, sus errores y el valor-p.

también éstas se registran en la época de menos precipitaciones como La Niña.

En cuanto a los índices de cambio climático, es importante mencionar que aunque las tendencias encontradas tienen una significancia estadística inferior al 80%, no pueden ser ignoradas, ya es la presencia de ENSO la responsable de que se registren valores extremadamente altos que afecten a las tendencias encontradas.

Así, en lo que se refiere a las precipitaciones, se puede apreciar un incremento en la intensidad eventos extremos de precipitación en la región costa (RX1day, RX5day), mas no en su frecuencia (PRCPTOT, CWD). Lo que hace visible que la ciudad de Machala se encuentre en amenaza por los procesos de inundación repentinos, que generalmente se dan en días puntuales. Cabe indicar que todos los índices de precipitación en la Sierra disminuyen por lo que es necesario repensar el impacto en eventos de desertización que se puede tener en esta zona.

Finalmente, en cuanto al comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas, se visibiliza un incremento tanto en frecuencia (SU25) como en in-

tensidad (TXx, TNn). Las temperaturas mínimas tienen un incremento mucho más significativo que las altas. Lo que puede reflejar un efecto combinado del Cambio Climático con el efecto de Isla de Calor.

5 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana y al Instituto Americano de Cambio Global IAI por el financiamiento de esta investigación. Al INAMHI, SNGR, Instituto Geográfico Militar y a la NOAA por los datos utilizados en este estudio.

Bibliografía

- CAF. 2000. Las lecciones de El Niño. **Ecuador: CAF.** <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/675>
- Camposano, L., D. Ballari y R. Celleri. 2014. Imágenes TRMM para identificar patrones de pre-

- cipitación e índices ENSO en Ecuador. **MASKANA**. páginas 185-191.
- CENAPRED. 2009. Inundaciones, 1^{ra} Ed. **Mexico: Centro Nacional de Prevención de Desastres**. (V. Ramos, Ed.) México D.F.
- CEPAL-BID. 2000. Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres. Nueva Orleans.
- EPMAPS. 2016. EPMAPS Agua de Quito. <http://www.aguaquito.gob.ec/distribucion-0>
- GADMachala. 2015a. Acciones para mitigar fenómeno de El Niño: MUNICIPALIDAD DE MACHALA PREPARA TALLER DE PREVENCIÓN DE RIESGOS Y DESECHOS SÓLIDOS EN EL MACHO. **Alcaldía Machala-Noticias**. <http://www.machala.gob.ec/noticias/acfnino.html>
- GADMachala. 2015b. MUNICIPALIDAD DE MACHALA CONTINÚA ORGANIZANDO PLANES PREVENTIVOS ANTE FENÓMENO DE EL NIÑO. **Alcaldía Machala-Noticias**. <http://www.machala.gob.ec/noticias/ppfn1015.html>
- INDECI. 2006. Manual Básico para la Estimación del Riesgo, 1^{ra} Ed. **Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)**. Lima, Perú.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995, The Science of Climate Change. **CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS**.
- Landa, R., V. Magaña y C. Neri. 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. **México: SEMART**. Tlalpan, México D.F.
- Macas, F. 2015a. La tarifa de agua aumentó en Machala. **El Universo**. <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/08/04/nota/5053273/tarifa-agua-aumento-machala>
- Mendoza, G. 2014. Crecimiento económico y barrios urbanos marginales en Machala Ecuador. **Revista semestral de investigación de la Corporación Internacional para el Desarrollo Educativo-CIDE**. 1(14). Año 8.
- MSP. 2012. Infórmate sobre el Fenómeno de El Niño. <http://www.salud.gob.ec/informate-sobre-el-fenomeno-de-el-nino/>
- Muñoz, Á., C. Recalde, J. Cadena, A. Núñez, J. Díaz y R. Mejía. 2010. Análisis Estadístico con Fclimdex para Ecuador, Informe Final. **Ecuador: INAMHI-MAE**.
- NOAA. 2015a. Description of Changes to Oceanic Niño Index (ONI). **National Weather Service Climate Prediction Service**. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml
- NOAA. 2015b. El Niño/Southern Oscillation. **National Weather Service Weather Forecast Office**. <http://www.srh.noaa.gov/fwd/?n=basics>
- OMM. 2012. Glosario Hidrológico Internacional. **Suiza: Organización Meteorológica Mundial**.
- Riebeek, H. 2005. The Rising Cost of Natural Hazards. **NASA Earth Observatory**. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RisingCost/>
- Rueda, V. y C. Garcia. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. **Gaceta Ecológica**. páginas 7-23.
- Santos, J. 2004. Manual de Usuario R-Climdex (Versión español). **Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño CIIFEN**.
- Serrano, S. y L. Basile. 2012a. La precipitación intensa vista desde la criticalidad autoorganizanda y las transiciones de fase continuas: un nuevo enfoque de estudio. **La Granja**. 15(1):5-18.
- Serrano, S., D. Zuleta, V. Moscoso, P. Jácome, E. Palacios y M. Villacís. 2012b. Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. **La Granja**. páginas 23-47.
- Serrano, S., N. Vásquez, P. Jácome y L. Basile. 2014. Critical Phenomena of Rainfall in Ecuador. **Sun and Geosphere**. 9(1):73-76.

- Sillmann, J. V. 2013a. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 1: Model evaluation in the present climate. **J. Geophys. Res.** DOI:10.1002/jgrd.50203.
- Sillmann, J. V. 2013b. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 2: Future projections. **J. Geophys. Res.** DOI:10.1002/jgrd.50188.
- SNGR. 2012. Reporte de Inundaciones en la Costa ecuatoriana. Boletín.
- Subía, G. 2002. El niño 1997-1998, máximas precipitaciones y caudales registrados, áreas de afectación. **Curso internacional CISMID-JICA, II: Mitigación de los Efectos Causados por el Fenomeno El Niño.** página 11. Lima. <http://www.bvsde.paho.org/texcom/cd046995/GSubia.pdf>
- Trenberth, K. y N. C. (Eds). 2016. The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>
- UCAR. 2012. The COMET Program. **UCAR COMMUNITY PROGRAM.** https://www.meted.ucar.edu/climate/impacts/region_es/index.htm
- Walker, G. 1923. Correlation in seasonal variations of wheather. VIII A preliminary study of world weather. **Mem. Indian Meteorology.** 24(4):75-131.
- Zhang, X., G. Hegerl, F. Zwiers and J. Kenyon. 2004. RCLimDex (1.0) User Manual. **Downsview, Ontario: Climate Research Branch, Environment Canada.**