

SENSORES REMOTOS, GIS Y SOFTWARE R

aplicado a Hidrogeología y Cambio Climático

Eddy Fernando Sánchez Sánchez



Eddy Fernando Sánchez Sánchez

**SENSORES REMOTOS,
GIS Y SOFTWARE R
aplicado a Hidrogeología y
Cambio Climático**

Noviembre, 2021

Sensores remotos, GIS y software R aplicado a Hidrogeología y Cambio Climático

Eddy Fernando Sánchez Sánchez

Primera edición: PUCE, 2022

2022 Eddy Fernando Sánchez Sánchez

2022 Pontificia Universidad Católica del Ecuador



Centro de Publicaciones PUCE

www.edipuce.edu.ec

Quito, Av. 12 de Octubre y Robles

Apartado n.º 17-01-2184

Telf.: (5932) 2991 700

e-mail: publicaciones@puce.edu.ec

Diseño de portada y diagramación: Rosa Calahorrano

Foto de portada: Tomada del Internet

Impresión:

ISBN: 978-9978-77-625-4

Quito, agosto de 2022



Dedicatoria

A los estudiantes, profesionales e investigadores
que apoyen los proyectos de desarrollo local en
comunidades indígenas y urbano marginales.

A mi abuelita Matilde, que me enseñó el valor
de las cosas pequeñas en mis primeros años.

A mis padres, Fernando y Ruth, de quienes me
siento orgulloso y agradecido con Dios
por su ejemplo.

A mis hermanos: Ximena, Anita, Mauricio y mi hijo
Sebastián, que han compartido buenos momentos
de mi vida.

Epígrafe

“Estar atento a la polar, tener mano firme en el timón,
fuerza, coraje, constancia, atención: esto me ha
enseñado mi pobre vida...”

Simón Pedro

Agradecimientos y reconocimientos

La base de mi desarrollo profesional han sido mis profesores y alumnos, cuyos aportes han servido para concluir esta obra.

Agradezco a mi hijo Sebastián, quien fue el soporte tecnológico.

El ordenamiento territorial del recurso hídrico en las comunidades rurales de Talatac, Pucausha, Quilapungo (Zumbahua) y La Unión (Atacames); en el marco de los proyectos de “Responsabilidad Social” de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, motivó este trabajo.

Presentación, prefacio, introducción o prólogo

En el capítulo 1, la precipitación del 19 y 20 de marzo de 1998 (Fenómeno “El Niño”) permitió calcular los caudales del río Atacames, que inundaron las poblaciones aledañas.

En el capítulo 2, se utilizó un modelo de análisis, para predecir las zonas susceptibles de inundación; que demuestra una afectación positiva en las zonas de crecimiento urbano: La Unión y Atacames.

En el capítulo 3, el análisis morfométrico, hidrológico y NDVI reveló que el 38% de 514 km² de área de la cuenca inicial del río Toachi, tiene una prioridad de restauración hidrológica alta.

En el capítulo 4, Para validar un modelo de precipitación estadístico de la cuenca inicial del río Toachi, se usaron: datos climatológicos observados de la NASA 1901-2013, la estación meteorológica Pilaló 1991-2015 y modelos (RCP 8.5) de precipitación diaria 1900-

2100 (GIS-E2-R-p1 – NASA), que pronostican que la precipitación media aumenta del 20 al 24%, entre los años 2014 y 2100.

En el capítulo 5, Para validar un modelo estadístico de temperatura media de aire y precipitación de las islas Galápagos, se usaron: datos climatológicos observados de la fundación Charles Darwin 1965-2020, y modelos (RCP 8.5) de temperatura media de aire mensual y precipitación diaria 1965-2100 (HadGEM2-AO de KMA), que pronostican parcialmente: que la temperatura media del aire aumenta del 2.46 a 6.34 °C, entre los años 2020 y 2100.

Los estudios están orientados a poblaciones urbanas y rurales, en donde ha de concentrarse el esfuerzo del Ingeniero, para dar soluciones de ordenamiento territorial del agua y promover su desarrollo local.

Capítulo 1

**Exposición
de la ciudad de Atacames
ante el peligro de precipitaciones
extremas por fenómeno
“El Niño”**

Exposición de la ciudad de Atacames ante el peligro de precipitaciones extremas por fenómeno El Niño

Exposure of the city of Atacames to the danger of extreme rainfall due to El Niño phenomenon

Sánchez, Eddy¹

1.1 Resumen

La ciudad de Atacames crece a las orillas del río Atacames. Los bosques naturales están muy degradados, con pequeños remanentes de bosque primario. La ganadería extensiva y alto porcentaje de pastos están desertificando el suelo, permitiendo un aumento en la escorrentía superficial.

Los métodos utilizados en esta investigación son: Análisis estadístico de datos climatológicos entre los

1. Área de Geotecnia - Hidráulica y Sanitaria. Profesor de Suelos, Geología, Hidrología. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Apartado 17-01-2184, Quito, Ecuador.

años 1901 - 2010, utilización del test de Mann Kendall para definir la tendencia creciente o decreciente de precipitación anual y cálculo de caudales del cauce del río Atacames para precipitaciones acumuladas utilizando el módulo hydrology de ArcGis.

Los resultados obtenidos son: La precipitación entre los años 1901 y 2010 tiene un promedio anual de 1.312 mm, con una máxima de 2.809 mm en el año 1998 y una mínima de 738 mm en el año 1961. Las mayores precipitaciones de 580 mm se encuentran en el mes de marzo de 1998, tenemos los días 19 y 20 de marzo, precipitaciones acumuladas de 242 a 330 mm y coinciden con el Fenómeno El Niño. Las anomalías de precipitación más evidentes: 2.524 mm para el año 1983; 2.375 mm para el año 1997 y 2.809 mm para el año 1998. Existen 6 décadas con tendencia no significativa creciente, 4 décadas con tendencia no significativa decreciente y 1 década sin ninguna tendencia. Considerando precipitaciones promedio de 48 horas de lluvias (50, 100, 150, 200 y 250 mm), se obtuvo los caudales proyectados para el cauce del río Atacames hasta (29, 92, 174, 279, 355 m³/s) respectivamente.

Las zonas vulnerables de la ciudad de Atacames por crecimiento espontáneo del río tienen que ser estudiadas, utilizando un modelo hidrológico, con los caudales calculados en esta investigación.

Palabras clave: Cambio climático, fenómeno El Niño, precipitación, exposición, peligro.

Abstract

The city of Atacames grows on the banks of the Atacames River. The natural forests are highly degraded, with small remnants of primary forest. The extensive livestock and high percentage of pastures are desertifying the soil, allowing an increase in surface runoff.

The methods used in this investigation are statistical analysis of climatological data between the years 1901 - 2010, use of the Mann Kendall test to define the increasing or decreasing tendency of annual precipitation and calculation of flows of the Atacames river bed for accumulated rainfall using the ArcGis hydrology module.

The results obtained are: The precipitation between the years 1901 and 2010 has an annual average of 1,312 mm, with a maximum of 2,809 mm in the year 1998 and a minimum of 738 mm in the year 1961. The highest precipitations of 580 mm are found in the month of March 1998; we have on March 19 and 20, cumulative rainfall of 242 to 330 mm and coincide with El Niño Phenomenon. The most evident precipitation anomalies: 2,524 mm for the year 1983; 2,375 mm for the year 1997 and 2,809 mm for the year 1998. There are 6 decades with an increasing trend, 4 decades with a non-significant decreasing trend and 1 decade without any trend. Considering average rainfall of 48 hours of rainfall (50, 100, 150, 200 and 250 mm), the projected flows for the Atacames river channel were obtained up to (29, 92, 174, 279, 355 m³ /s) respectively.

The vulnerable zones of the city of Atacames due to spontaneous growth of the river have to be studied, using a hydrological model, with the calculated flows in this investigation.

Key words: Climate change, El Niño phenomenon, precipitation, exposure, danger.

1.2 Introducción

La ciudad de Atacames es la cabecera del cantón Atacames en la provincia de Esmeraldas – Ecuador, el cantón tiene una población fija de 46.000 habitantes en el año 2010, y una población flotante de turistas y dueños de departamentos vacacionales (INEC, 2017).

El área urbana de la ciudad de Atacames es una economía dependiente del turismo de temporada. Tiene una baja diversidad productiva, con altas limitaciones tecnológicas en agricultura ganadería y pesca. La industria y la manufactura es escasa o inexistente (GAD Atacames, 2014).

La ciudad crece a las orillas del río Atacames sin planificación y ordenamiento territorial adecuado (GAD Tonsupa, 2012). Los bosques naturales están muy degradados, con pequeños remanentes de bosque primario. La ganadería extensiva y alto porcentaje de pastos están desertificando el suelo, permitiendo un aumento en la escorrentía superficial que promueve las inundaciones. Para el crecimiento territorial de la ciudad es necesario

estudiar modelos de inundación en zonas críticas (GAD La Unión de Atacames, 2012).

La cuenca hidrográfica del río Atacames y sus aportantes tiene un área aproximada de 200 Km². El estudio hidrológico de los años 1901 – 2010 aportará datos para definir zonas de inundación críticas en zonas urbanas.

a. Objetivo

Determinar los caudales del río Atacames en función de la variabilidad de precipitaciones, como aporte al peligro de avenidas/crecidas del río para la ciudad de Atacames.

1.3 Materiales y métodos

La metodología por usar en la presente investigación será:

- Análisis estadístico de datos climatológicos y estudio de datos diarios de mayor precipitación, para el río Atacames y afluentes, entre los años 1901 y 2010 (NOAA, 2017), (NASA, 2017).
- Utilizar el test de Mann Kendall, con una significancia $\alpha = 0.05$, para definir la tendencia creciente o decreciente de precipitación anual (Tabla 1.1).

Tabla 1.1
Significancia del test de Mann – Kendall

Descripción de significancia del test Mann - Kendall		
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$		
SIGNIFICANCIA	SIMBOLOGÍA	Z
Sin tendencia	ST	0
Tendencia significativa creciente	TSC	>1.96
Tendencia significativa decreciente	TSD	<-1.96
Tendencia no significativa creciente	TNSC	<1.96
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	>-1.96

Fuente: (Alencar, K., 2017)

- Determinar la escorrentía superficial para la cuenca del río Atacames y afluentes, para precipitaciones acumuladas del mes con mayor pluviosidad.
- Calcular los caudales del río Atacames para precipitaciones acumuladas.
- Identificar infraestructura y población vulnerable de la cuenca del río Atacames y afluentes (SNI, 2017). En la Tabla 1.2 se observa los indicadores, parámetros y variables que aportan a los componentes: peligro y exposición.

Tabla 1.2
Indicadores, parámetros y variables de los componentes: peligro y exposición

Consecuencias de la variabilidad hídrica: avenidas e inundaciones en zonas pobladas del río Atacames							
Componente	Variable	Parámetro	Indicador	Datos	Escala espacial	Escala temporal	Fuente
Peligro	Caudal (m ³ /s)	Precipitaciones máximas	Precipitación mensual (mm)	DEM	Cuenca hidrográfica del río Atacames y afluentes (200 km ²)	1901 - 2010	(NOAA, 2017)
				Precipitación diaria			
		Escorrentía (m ³)	Precipitación acumulada	Cuenca geográfica			(NASA, 2017)
Exposición	Infraestructura		Distribución de bienes	Vías, casas, uso suelo.			Sistema Nacional Información SNI

Fuente: Elaboración propia

1.4 Resultados

1.4.1 Análisis estadístico de datos hidrológicos del río Atacames y sus aportantes

La precipitación entre los años 1901 y 2010 tiene un promedio anual de 1.312 mm, con una máxima de 2.809 mm en el año 1998 y una mínima de 738 mm en el año 1961. En la Figura 1.1, se observa los meses más lluviosos de enero a mayo con un promedio mensual de 109 mm. Las mayores precipitaciones de 580 mm se encuentran en el mes de marzo de 1998 y coinciden con el Fenómeno del Niño.

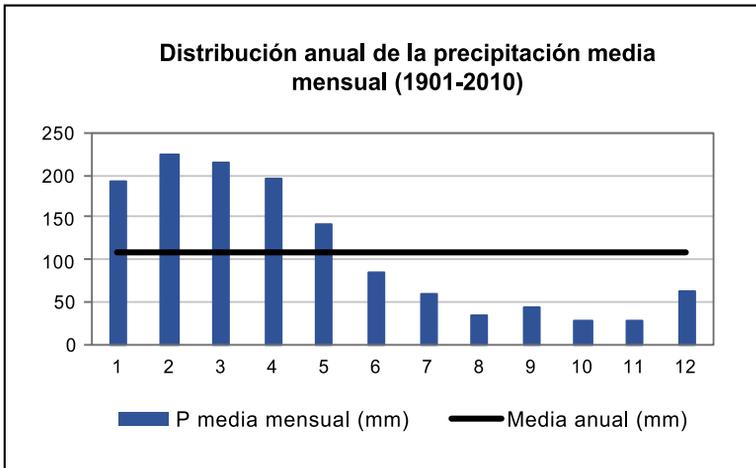


Figura 1.1 Distribución de la precipitación media mensual (1901-2010).
Fuente: (NOAA, 2017).

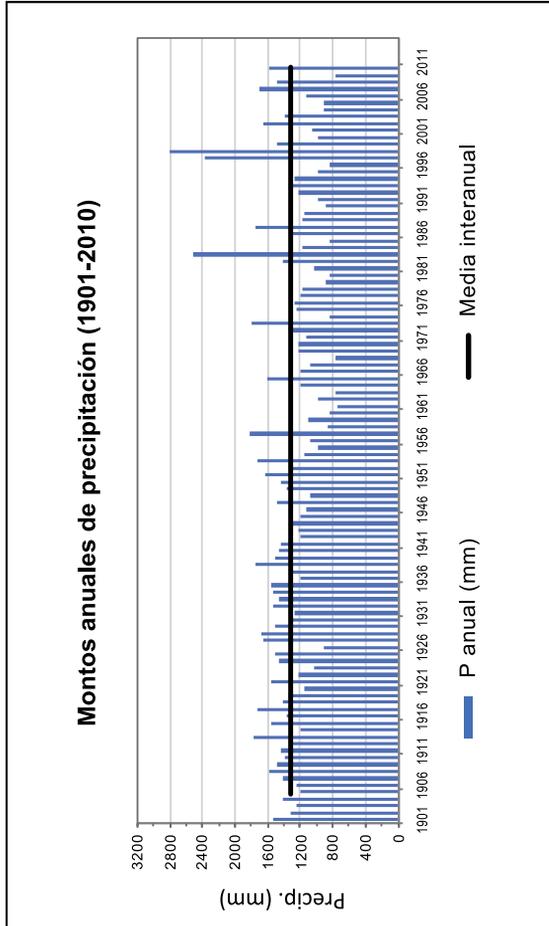


Figura 1.2 Montos anuales de precipitación (1901-2010).
Fuente: (NOAA, 2017).

En la Figura 1.2, podemos observar las anomalías de precipitación más evidentes: 2.524 mm para el año 1983; 2.375 mm para el año 1997 y 2.809 mm para el año 1998.

Realizando un estudio de significancia ($\alpha = 0.05$) con el test de Mann Kendall se obtuvo: 6 décadas con tendencia no significativa creciente (TNSC), 4 décadas con tendencia no significativa decreciente (TNSD) y 1 década sin ninguna tendencia (ST) (Tabla 1.3).

1.4.2 Determinar la escorrentía superficial del río Atacames con precipitaciones históricas extremas.

Siendo marzo de 1998, el mes con las mayores precipitaciones entre los años 1901 y 2010, tenemos los días 19 y 20 de marzo, precipitaciones acumuladas de 242 a 330 mm en la zona de estudio (NASA, 2017).

Utilizando el módulo hydrology de ArcGis, calculamos los caudales del río Atacames para 200 mm de precipitación en 48 horas, con resultados entre 202 y 279 m³/s en el cauce del río en zona urbana.

En la Tabla 1.4 se tiene precipitaciones promedio para 48 horas de lluvias y los caudales proyectados para 50, 100, 150, 200 y 250 mm en el cauce del río Atacames. No llegamos a 330 mm considerando disminución por infiltración en el suelo.

Tabla 1.3
Resultados del test de Mann Kendall por décadas
desde 1901 hasta 2010

Nivel de significancia $\alpha=0.05$

DESDE	HASTA	Z	ST	TSD	TNSD	TNSC	TSC
1901	1910	0,72				X	
1911	1920	-0,72			X		
1921	1930	0,54				X	
1931	1940	0,54				X	
1941	1950	0,00	X				
1951	1960	-1,61			X		
1961	1970	1,43				X	
1971	1980	-1,43			X		
1981	1990	-0,72			X		
1991	2000	0,72				X	
2001	2010	0,18				X	

Nota. ST: Sin tendencia, TSD: Tendencia significativa decreciente, TNSD: Tendencia no significativa decreciente TNSC: Tendencia no significativa creciente, TSC: Tendencia significativa creciente.

Tabla 1.4
Resultados de caudales del río Atacames para precipitaciones acumuladas de 48 horas

Precipitación (mm)	Caudal río Atacames (m ³ /s)	
	Desde	Hasta
48 horas		
50	13	29
100	81	92
150	111	174
200	202	279
250	259	355

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1.3 se observa los gráficos de tendencia para la tabla 4. La correlación lineal es muy buena ($r^2 = 0.98$, $r^2 = 0.99$).

1.4.3 Zonas vulnerables de la ciudad de Atacames por crecidas del río Atacames

Existe infraestructura como: vías, puentes y viviendas a orillas del río Atacames, que eventualmente serán afectadas por inundaciones y crecidas en próximos fenómenos de El Niño. La zona de inundación y las piscinas camaroneras ya demuestran zonas amplias de inundación al sur de la ciudad de Atacames (SNI, 2017). En la

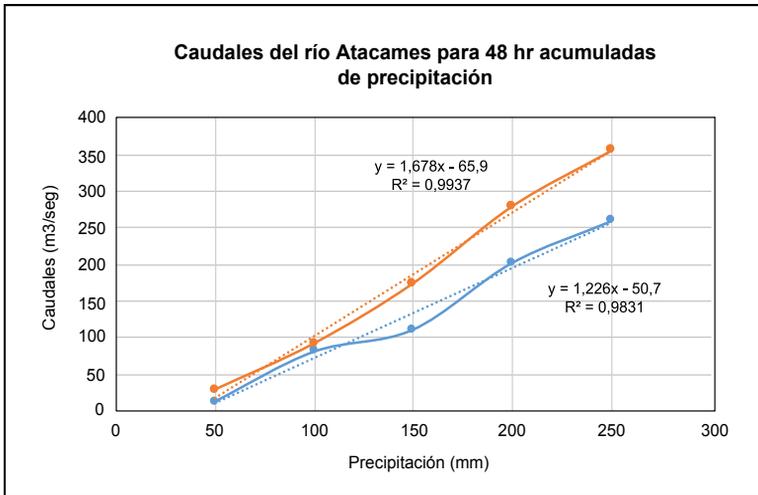


Figura 1.3 Líneas de tendencia e índice de correlación para las curvas de caudales vs. mm de precipitación para el río Atacames.

Figura 1.4, se observa la ciudad de Atacames, que puede ser afectada por crecimiento espontáneo del río. Se debe estudiar la inundación, utilizando un modelo hidrológico, con los caudales calculados en esta investigación.

1.5 Discusión y conclusiones

La precipitación entre los años 1901 y 2010 tiene un promedio anual de 1.312 mm con una máxima de 2.809 mm en el año 1998. Los meses más lluviosos son de enero a mayo con un promedio mensual de 109 mm. La precipitación máxima de 580 mm se encuentra en el mes de marzo de 1998. Las precipitaciones acumuladas para el 19 y 20 de marzo de 1998 son de 242 a 330 mm.

Utilizando el test de Mann Kendall con una significancia $\alpha = 0.05$ se obtuvo: 6 décadas con tendencia no significativa creciente (TNSC), 4 décadas con tendencia no significativa decreciente (TNSD) y 1 década sin ninguna tendencia (ST).

Considerando precipitaciones promedio de 48 horas de lluvias (50, 100, 150, 200 y 250 mm), se obtuvo los caudales proyectados para el cauce del río Atacames hasta (29, 92, 174, 279, 355 m³/s) respectivamente.

Es necesario tener una topografía a escala menor a 1:1.000 en el cauce del río y sus alrededores, para confrontar la información con los caudales de crecida en un modelo hidrológico, que permita identificar zonas urbanas de potencial inundación.

1.6 Bibliografía

Alencar, K. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó - Pernambuco - Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 58, 295–313.

GAD Atacames. (2014, 2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Atacames.

GAD La Unión de Atacames. (2012, 2021). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia La Unión de Atacames.

GAD Tonsupa. (2012, 2022). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Tonsupa.

INEC. (2017). Ecuador en cifras. Recuperado a partir de www.ecuadorencifras.gov.ec

NASA. (2017). Giovanni. Recuperado a partir de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

NOAA. (2017). GPCC Global Precipitation Climatology Centre. Recuperado a partir de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>

SNI. (2017). Sistema Nacional de Información del Ecuador. Recuperado a partir de sni.gov.ec

Capítulo 2

Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones de la cuenca del río Atacames-Esmeraldas- Ecuador

Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones de la cuenca del río Atacames-Esmeraldas-Ecuador

Multicriteria evaluation of biophysical vulnerability to floods in the river basin Atacames-Esmeraldas-Ecuador

Sánchez, Eddy.²

2.1 Resumen

En la cuenca hidrográfica del río Atacames los bosques naturales están muy degradados, con pequeños remanentes de bosque primario. La ganadería extensiva y alto porcentaje de pastos están desertificando el suelo, permitiendo un aumento en la escorrentía superficial que promueve las inundaciones. Esta investigación permite estudiar las zonas de inundación en la cuenca hidrográfica del río Atacames utilizando la escala Satty y la lógica Fuzzy, que comparan y normalizan las variables que influyen en la inundación.

2. Área de Geotecnia. Profesor de Geología. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

El modelo para el análisis de inundación usa el método de toma de decisiones multicriterio AHP para la elaboración de cartografía de amenazas por inundación, de la Secretaría de Gestión de Riesgo del Ecuador (SGR, 2017), la misma es una teoría de jerarquización y generalización de información (Moreno. J, 2002).

Los factores considerados para predecir las zonas susceptibles de inundación en la zona son: precipitación y cantidad de lluvia, pendientes y zonas de acumulación, textura de suelo, uso y cobertura vegetal, y, saturación. El modelo de inundaciones demuestra una afectación positiva en las zonas de crecimiento urbano.

Palabras clave: Amenaza, inundación, escorrentía, precipitación, cuenca hidrográfica.

Abstract

In the Atacames river basin, natural forests are highly degraded, with small remnants of primary forest. The extensive livestock and high percentage of pastures are desertifying the soil, allowing an increase in surface runoff that promotes flooding. This investigation allows studying the flood zones in the Atacames river basin using the Satty scale and the Fuzzy logic, which compare and normalize the variables that influence the flood.

The model for flood analysis uses the method of decision making multicriteria AHP for the preparation of flood hazard mapping, the Secretariat of Risk

Management of Ecuador (SGR, 2017), it is a theory of hierarchy and generalization of information (Moreno, J, 2002).

The factors considered to predict the areas susceptible to flooding in the area are: precipitation and amount of rain, slopes and accumulation zones, soil texture, use and vegetation cover, and saturation. The flood model demonstrates a positive impact in urban growth areas.

Keywords: Threat, flood, runoff, precipitation, watershed.

2.2 Introducción

Las inundaciones se relacionan con la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos. La probabilidad de que una inundación se convierta en desastre se debe a la ocurrencia simultánea de peligro y vulnerabilidad. La vulnerabilidad es la condición que define la predisposición intrínseca de un sistema a ser afectado por un fenómeno, mientras que peligro se asocia con eventos naturales o antrópicos (Chávez. M, Binnquist. G, & Salas. A, 2017). Históricamente, las inundaciones han sido parte integrante del encuentro humano. Son fenómenos regulares y persistentes de todas las cuencas y sistemas costeros de tierras bajas (Lawal. D et al., 2014)

La cuenca hidrográfica del río Atacames y sus aportantes tiene un área de 208 Km². El presente estudio

aportará datos para definir zonas de inundación críticas en zonas urbanas y rurales. Existe infraestructura como: vías, puentes y viviendas a orillas del río Atacames, que eventualmente serán afectadas por inundaciones y crecidas en los próximos años. El fenómeno del niño y los sismos han incidido en el desarrollo del cantón Atacames (Fenómeno del Niño, marzo-1998; sismo de Atacames de 5.4 Richter, 19 de diciembre de 2016).

La ciudad de Atacames es la cabecera del cantón Atacames en la provincia de Esmeraldas – Ecuador, crece a las orillas del río Atacames sin planificación y ordenamiento territorial adecuado (GAD Tonsupa, 2012). El cantón tiene una población fija de 46.000 habitantes en el año 2010, y una población flotante de turistas y dueños de departamentos vacacionales (INEC, 2017).

El área urbana de la ciudad de Atacames es una economía dependiente del turismo de temporada. Tiene una baja diversidad productiva, con altas limitaciones tecnológicas en agricultura ganadería y pesca. La industria y la manufactura es escasa o inexistente (GAD Atacames, 2014).

Los bosques naturales están muy degradados, con pequeños remanentes de bosque primario. La ganadería extensiva y alto porcentaje de pastos están desertificando el suelo, permitiendo un aumento en la escorrentía superficial que promueve las inundaciones. Para el crecimiento territorial de la ciudad es necesario estudiar modelos de inundación en zonas críticas (GAD La Unión de Atacames, 2012).

Esta investigación permite estudiar las zonas de inundación en la cuenca hidrográfica del río Atacames utilizando la escala Satty y la lógica Fuzzy, que comparan y normalizan las variables que influyen en la inundación.

En la Figura 2.1 se muestra la cuenca hidrográfica del río Atacames, los cantones aledaños y su ubicación geográfica en el Ecuador continental.

Algunos investigadores para cada amenaza desarrollan un conjunto de indicadores que expresan el riesgo físico y la capacidad de afrontamiento o la capacidad de recuperación del sistema. Al combinar estos indicadores a través de diferentes estrategias de ponderación (Fuzzy models), calculan un riesgo total para cada amenaza.

Se integran estos riesgos aplicando la ponderación de AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y derivan en un conjunto de mapas de riesgo múltiple (Lari, S, Frattini, P, & Crosta, G, 2009), Otros usan la metodología de toma de decisiones multicriterio de comparación por pares AHP para el estudio de otras ciencias (Pérez, F, Vargas, B, Aguirre, O, Corral, J, & Rojo, A, 2012).

El método de toma de decisiones multicriterio AHP, ayuda a especificar pesos numéricos, que representan la importancia relativa de los factores, estos criterios permiten realizar modelos de susceptibilidad a inundaciones (Lawal, D et al., 2014). Se entiende por decisión multicriterio al conjunto de técnicas dirigidas a mejorar los procesos de decisión y a incrementar el conocimiento de estos, permitiendo una resolución más

realista y efectiva del problema. El AHP es una teoría sobre juicios y valores, basada en escalas de razón de orden jerárquico para capturar y generalizar la información, que permite combinar escalas de razón para comprender el mundo humano (Moreno. J, 2002).

La metodología AHP puede sintetizarse en que: **a.** Utiliza jerarquías para formalizar el modelo mental en el modelo estructural asociado; **b.** Utiliza conglomerados para integrar lo muy pequeño con lo muy grande; **c.** Utiliza comparaciones pareadas al incorporar las preferencias de los actores entre elementos; **d.** Utiliza la escala fundamental de Saaty $\{1,3,5,7,9\}$ para incorporar los juicios o valoraciones del decisor; **e.** Las prioridades derivadas vienen dadas por una escala de razón (Moreno. J, 2002)

El análisis de decisión de criterios múltiples trabajado en Sistemas de Información Geográfica (GIS) es una técnica mediante la cual el procesamiento de datos geográficos y la toma de decisiones se aplican conjuntamente para obtener la solución más adecuada al problema de investigación (Sukcharoen. T, Weng. J, & Teetat. C, 2016).

El objetivo de esta investigación es determinar las zonas de inundación del río Atacames, utilizando AHP y la propuesta metodológica para la elaboración de cartografía de amenazas por inundación, de la Secretaria de Gestión de Riesgo del Ecuador (SGR, 2017).

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Selección de criterios y factores de influencia de la inundación en el área de estudio

Ciertos factores que influyen en la inundación natural fueron considerados en este estudio para predecir las zonas susceptibles de inundación en la zona. Los factores considerados son: precipitación y cantidad de lluvia, pendientes y zonas de acumulación, textura de suelo, uso y cobertura vegetal, y, saturación.

a. La lluvia y su influencia en la generación de inundaciones:

La precipitación es el factor principal que aporta a la escorrentía durante un evento de inundación. La época de lluvias influye en la escorrentía superficial de la cuenca que depende de la distribución de sus formas hidrográficas.

Para definir la precipitación de la zona de estudio se realizó un análisis estadístico de datos climatológicos, para el río Atacames y afluentes, entre los años 1901 y 2010 (Figura 2.2) (NOAA, 2017).

Utilizando el mes de febrero de mayor precipitación histórica, se realizó la Tabla 2.1 con precipitaciones entre los años: 1970-2000 (Fick. S, & Hijmans. R, 2016).

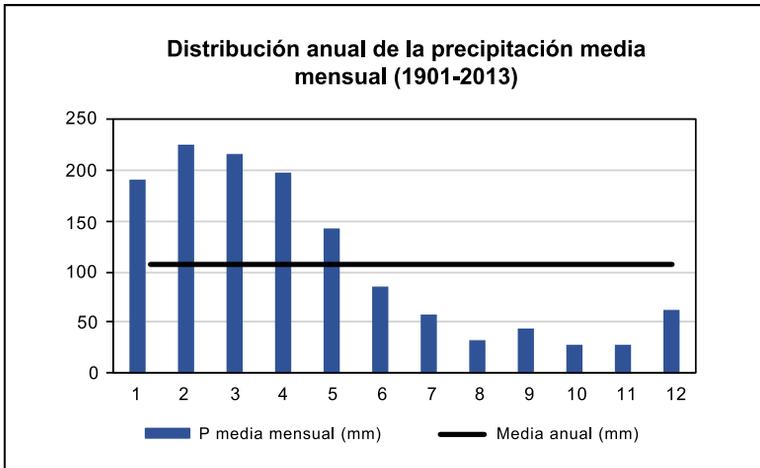


Figura 2.2 Precipitación histórica, Atacames años 1901-2010.
Fuente: (NOAA, 2017).

Tabla 2.1
 Precipitación histórica del mes de febrero, cuenca
 río Atacames, 1970 – 2000.

Precipitación, febrero 1970-2000		
Peso	desde (mm)	hasta (mm)
1	189	200
2	201	210
3	211	220
4	221	230
5	231	240
6	241	247

Fuente: (Fick. S, & Hijmans. R, 2016)

2.3.2 Pendiente y su influencia en la inundación

La pendiente determina la velocidad con que el agua fluye. La pendiente controla la tasa de infiltración de aguas subterráneas subsuperficiales. Cuando la pendiente es suave, la escorrentía superficial es lenta, permitiendo la infiltración de agua y saturación del suelo, entonces el área será más susceptible a la inundación.

Para definir las pendientes se utilizó un MDT de escala 1:5000 (IGM, 2018) y se trabajó con Reclassify de ArcGis (Tabla 2.2).

Tabla 2.2

Clasificación de pendientes, cuenca río Atacames

Peso	desde (%)	hasta (%)	Categoría
1	0	5	Muy suave
2	5	12	Suave
3	12	25	Media
4	25	40	Media a fuerte
5	40	70	Fuerte

Fuente: (SGR, 2017)

b. Textura de suelo y su influencia en la inundación:

La gran mayoría de suelos se componen de nutrientes orgánicos, partículas de roca junto con agua y aire

en sus espacios intersticiales. El proceso de exposición a la intemperie en particular es el responsable de la estructura física. Las partículas pueden ser minerales de arcilla cuyo atributo es la impermeabilidad, y su respuesta es el aumento de la escorrentía superficial, mientras que arenas y gravas pueden ser muy permeables, disminuyendo la escorrentía superficial y el grado de inundación.

Para definir la textura del suelo se usó la Tabla 2.3 (SGR, 2017) y la clasificación de suelos del Ecuador (IGM, s. f.).

Tabla 2.3
Textura según la Secretaría de Gestión de Riesgos
de Ecuador

Peso	Categoría	Clase textural
1	Gruesa	Arenoso, franco arenoso
2*	Moderadamente gruesa	Franco arenoso.
3	Media	Limoso, franco arcilloso, franco arcillo arenoso, franco arcillo limoso.
4	Fina	Arcillo arenoso, arcillo limoso, franco arcilloso.
5	Muy Fina	Arcilloso.

*valor no encontrado en la cuenca del río Atacames.

c. Uso y cobertura vegetal y su influencia en la inundación

El uso del suelo está asociado con actividades humanas como la agricultura. El uso del suelo depende de una serie de factores como: tipo de suelo, pluviometría, topografía, áreas urbanizadas y accesibilidad. Actividades antrópicas como la deforestación, agricultura intensiva, drenajes, vías, urbanizaciones afectan la hidrología natural de la cuenca. Uno de los impactos en el uso del suelo es la diferente tasa de evapotranspiración que tiene la: cobertura vegetal, área foliar y profundidad de raíces (Lawal. D et al., 2014).

Para definir uso de suelo y cobertura vegetal se utilizó las capas uso de suelo (SIGTIERRAS, 2014) y la clasificación de uso Tabla 2.4 (SGR, 2017).

Tabla 2.4
Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca del río Atacames

Peso	Clase
1	Bosque nativo
2	Plantación forestal
3	Pastizal, misceláneos frutales, cacao, palma africana.
4	Cultivos de ciclo corto, misceláneo indiferenciado
5 ^a	Área urbana, uso antrópico, cuerpos agua

^a Revisado por los autores

Fuente: (SIGTIERRAS, 2014)

d. Saturación y su influencia en la inundación

El nivel freático puede ser superficial o profundo. Sí es superficial y el sustrato que lo contiene es muy permeable, luego de una lluvia intensa se dará una rápida saturación del suelo provocando escorrentía superficial que aporta a la inundación.

Para definir la profundidad del nivel freático se utilizó la Tabla 2.5, de la clasificación de suelos de Ecuador (IGM, s. f.).

Tabla 2.5
Profundidad de nivel freático

Peso	Rango (cm)	Categoría
1	0 - 20	Superficial.
2*	20 - 50	Poco profundo.
3*	50 - 100	Moderadamente profundo.
4	> 100	Profundo.

*valores no encontrados en la cuenca del río Atacames

2.3.3 Asignación de pesos a los factores que influyen a la inundación

Se utilizó la técnica AHP desarrollada por Saaty (1980) para definir los pesos relativos de cada factor que influyen en la inundación. El criterio para asignar pesos a los factores depende del juicio de los autores de

esta investigación (Geología, Hidrología). La escala de influencia de Saaty (1 a 9) como se muestra en la Tabla 2.6, permitió que los factores sean comparados y calificados de acuerdo con su nivel de influencia en la generación de inundaciones. Basado en la experiencia de los autores de esta investigación se generó una matriz de comparación por pares y se definió los pesos de los factores que influyen esta investigación.

Utilizando lógica Fuzzy para normalizar las variables que influyen la inundación, e integrando los resultados del proceso de jerarquía analítica AHP, a un GIS, por superposición de capas temáticas, se simuló la inundación y se obtuvo las áreas vulnerables, mismas que están basadas en las preferencias de los autores de esta investigación.

2.4 Resultados

2.4.1 Comparación por factores utilizando la técnica AHP

Promediando los resultados AHP. Donde las variables son:

C1 = Precipitación

C2 = Pendiente

C3 = Textura de suelo

C4 = Uso y cobertura vegetal

C5 = Saturación

Tabla 2.6
Interpretación de escala Saaty

Grado de importancia	Definición	Interpretación
1	Igual importancia	2 actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra, su dominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra; es absoluta y totalmente clara
Escala 2, 4, 6 y 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

Fuente: (Osorio. J & Orejuela. J, 2008)

Las Tabla 2.7 y Tabla 2.8, muestran las comparaciones de pares de factores y resultados de las variables ponderadas.

Para calcular el Índice de Consistencia CI se usó la ecuación (1):

$$CI = \lambda - n / n - 1 \quad (1)$$

Donde, n = número de factores ($n=5$) y λ = valor promedio del vector de consistencia, determinado en la Tabla 2.9.

$$CI = 5.36 - 5/5 - 1 = 0.09$$

Calculamos el Radio de Consistencia CR con la fórmula (2):

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

Donde, RI es el índice de inconsistencia aleatorio que depende del número (n) de factores que se comparan; para $n = 5$, $RI = 1.12$ que se observa en la Tabla 2.10 (Saaty, 1980).

$$CR = 0.09/1.12 = 0.08$$

Según (Lawal. D et al., 2014), $0.08 < 0.1$, indica que hay un grado de consistencia realista en la comparación por pares y, como resultado, el peso de 0.35, 0.24, 0.08, 0.11, 0.22 puede ser asignado a: precipitación, pendiente, textura, uso – cobertura vegetal y saturación de suelo, respectivamente.

Tabla 2.7

Matriz de comparación por factores pares de cinco criterios con el proceso AHP

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00
C2	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00
C3	0.50	0.50	1.00	0.50	0.33
C4	0.50	0.50	2.00	1.00	0.33
C5	0.50	0.33	3.00	3.00	1.00
SUMA	3.50	3.33	10.00	8.50	6.67

Tabla 2.8

Determinación de los pesos relativos de criterio.

	C1	C2	C3	C4	C5	PESO (W)
C1	0.29	0.30	0.20	0.24	0.30	0.26
C2	0.29	0.30	0.20	0.24	0.45	0.29
C3	0.14	0.15	0.10	0.06	0.05	0.10
C4	0.14	0.15	0.20	0.12	0.05	0.13
C5	0.14	0.10	0.30	0.35	0.15	0.21
SUMA						1.00

Tabla 2.9
 Índice de consistencia CI y rango
 de consistencia CR

M=N*W	COCIENTE =M/W	CI=(λ-n)/(n-1)	CI = 0.09
1.44	5.46	CR=CI/RI	CR = 0.08
1.65	5.61		
0.52	5.14		
0.68	5.16		
1.14	5.43		
λ=	5.36		
n=	5.00		

Tabla 2.10
 Índices de inconsistencia aleatorios

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.4.2 Generación de mapa de inundación con lógica Fuzzy

Con los pesos: 0.35, 0.24, 0.08, 0.11, 0.22 asignados a las variables: precipitación, pendiente, textura, uso – cobertura vegetal y saturación de suelo, respectivamente; se utilizó la lógica Fuzzy para normalizar cada variable y con álgebra de mapas de ArcGis, se obtuvo las áreas de inundación de la cuenca hidrográfica del río Atacames (Figura 2.3).

2.4.3 Discusión y resultados finales (compilación)

Los territorios de mayor inundación en los meses de febrero que son los más lluviosos, se encuentran las zonas rurales de: Agua Fría, La Lucha, La Unión, Salima y en la zona urbana de la ciudad de Atacames. En la Tabla 2.11, se observa el área y porcentaje según el grado de inundación.

Los territorios de mayor inundación se encuentran las zonas rurales de: Agua Fría, La Lucha, La Unión, Salima y en la zona urbana de la ciudad de Atacames. Sin embargo, solo el 36% presenta una vulnerabilidad Alta a Muy Alta.

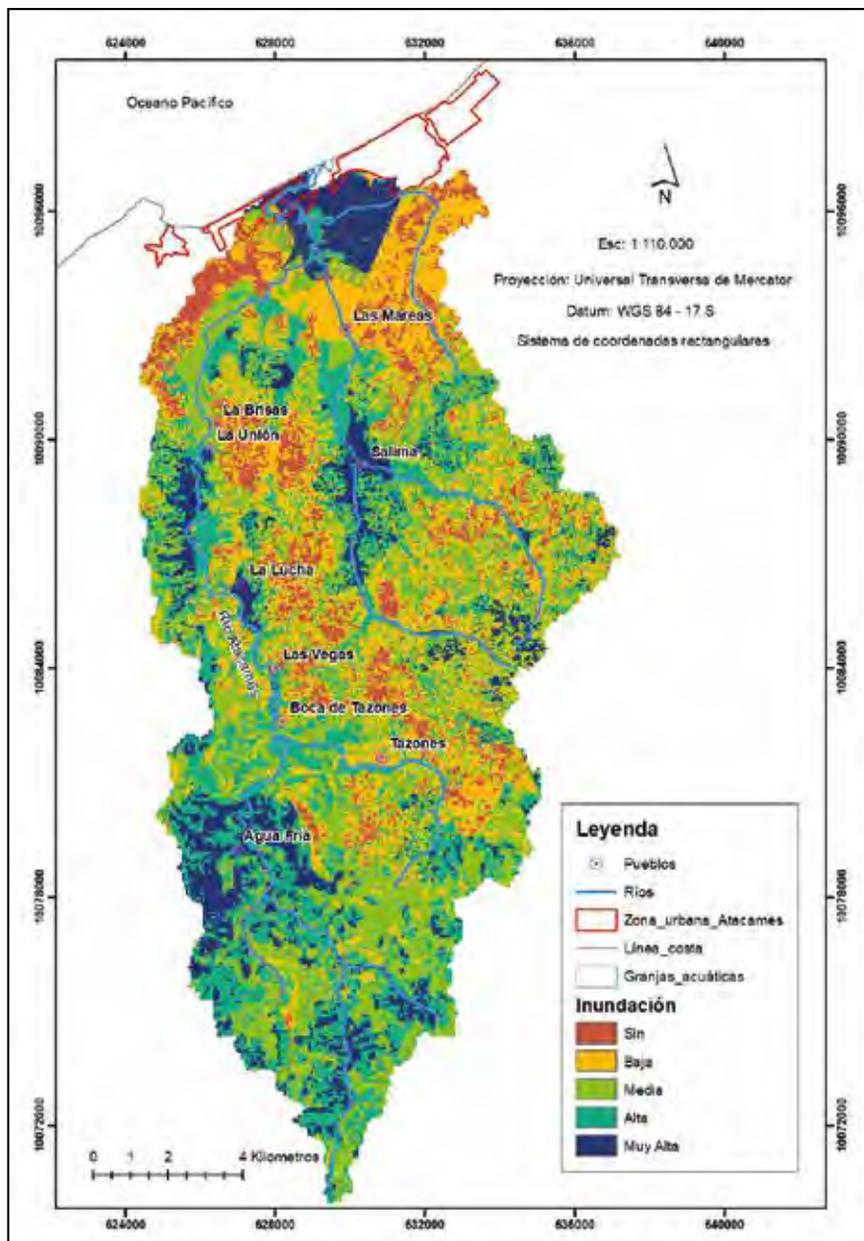


Figura 2.3 Áreas de inundación de la cuenca hidrográfica del río Atacames

Tabla 2.11
 Área y porcentaje de inundación en la cuenca
 hidrográfica del río Atacames

Inundación	Área (Km ²)	%
Sin	19.3	9
Baja	47.5	23
Media	66.3	32
Alta	49.6	24
Muy Alta	25.3	12
Total	208.1	100

2.5 Conclusiones

El 9% del territorio estudiado no presenta amenazas de inundación, el 55% presenta una vulnerabilidad Baja a Media y el 36% presenta una vulnerabilidad Alta a Muy Alta. Las zonas más pobladas y de mayor vulnerabilidad son: La Unión de Atacames y Atacames.

Un porcentaje considerable de la ciudad de Atacames se ve afectada por el modelo de inundación estudiado. La zona de inundación coincide con el uso del territorio, por granjas acuáticas, para el cultivo de camarones.

El presente estudio no contempla las mareas oceánicas ni eventos periódicos del fenómeno “El Niño”, el cual profundizará los efectos de las limitaciones de drenaje, afectando a mayor escala las zonas de inundación estudiada, lo que incrementará el peligro de inundación.

2.6 Bibliografía

- Chávez. M, Binnquist. G, & Salas. A. (2017). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. Scielo - Ecosistemas y recursos agropecuarios, 4(10).
- Fick. S, & Hijmans. R. (2016). Global Climate Data. Recuperado de <http://worldclim.org>
- GAD Atacames. (2014, 2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Atacames.
- GAD La Unión de Atacames. (2012, 2021). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia La Unión de Atacames.
- GAD Tonsupa. (2012, 2022). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Tonsupa.
- IGM. (2018). MDT Atacames. Quito.
- IGM. (s. f.). Clasificación de suelos del Ecuador. Quito.
- INEC. (2017). Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>
- Lari. S, Frattini. P, & Crosta. G. (2009). Integration of natural and technological risks in Lombardy, Italy.

Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 2085–2106.

Lawal. D, Matori. A, Yusof. K, Hashim. A, Aminu. M, Sabri. S, ... Mohd. M. (2014). Group-based Decision Support for Flood Hazard Forecasting: A Geospatial Technology-based Group Analytic Hierarchy Process Approach. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(23): 4838-4850, 2014.

Moreno. J. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, Metodología y Aplicaciones.

NOAA. (2017). Earth System Research Laboratory. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>

Osorio. J, & Orejuela. J. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. Scientia Et Technica, XIV (39), 247–252.

Pérez. F, Vargas. B, Aguirre. O, Corral. J, & Rojo. A. (2012). Proceso analítico jerárquico para seleccionar métodos de manejo forestal en Durango. Rev. Mex. Cien. For., 4(15), 55–72.

SGR. (2017). Propuesta metodológica para la elaboración de cartografía de amenazas por inundación. Secretaría de Gestión de Riesgos del Ecuador.

SIGTIERRAS. (2014). Uso de suelo.

Sukcharoen. T, Weng. J, & Teetat. C. (2016). GIS-based flood risk model evaluated by Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII, 9998.

Capítulo 3

Priorizar áreas de restauración hidrológica usando análisis morfométrico, precipitación y NDVI; para la cuenca inicial del río Toachi

Priorizar áreas de restauración hidrológica usando análisis morfométrico, precipitación y NDVI; para la cuenca inicial del río Toachi

Prioritize hydrological restoration areas using morphometric analysis, precipitation and NDVI; for the initial basin of the Toachi River

*Sánchez, Eddy.*³

3.1 Resumen

El estudio se realizó en la cuenca inicial del río Toachi, ubicada en los cantones Sigchos y Pujilí de la provincia de Cotopaxi, Ecuador, con el objetivo de estimar los parámetros morfométricos (lineales y de forma) de 16 subcuencas, su hidrología y el NDVI en los años 1996 y 2017 que identifican los cambios en el tiempo de la cobertura vegetal. Estos parámetros afectan la degradación del

3. Área de Geotecnia. Profesor de Geología. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Apartado 17-01-2184, Quito, Ecuador;

suelo de las subcuencas y permiten priorizar las áreas de restauración hidrológica, considerando la toma de decisiones multicriterio.

El análisis morfométrico, hidrológico y NDVI reveló que el 38% de 514 km² de área de la cuenca estudiada tiene una prioridad de restauración hidrológica alta, el 23% media y el 39% baja, considerando para el cálculo de NDVI, los meses de septiembre y octubre de los años 2017 y 1996 respectivamente, con una precipitación promedio entre 56 y 78 mm (NOAA, 2019).

Palabras clave: Conservación, cuenca hidrográfica, morfometría, NDVI, precipitación, sensores remotos.

Abstract

The study was conducted in the basin of the Toachi river, located in the cantons Sigchos and Pujilí of the province of Cotopaxi, Ecuador, with the objective of estimating the morphometric parameters (linear and shape) of 16 sub-basins, their hydrology and the NDVI in the years 1996 and 2017 that identify the changes in the time of the vegetal cover. These parameters affect the soil degradation of the sub-basins and allow the prioritization of hydrological restoration areas, taking into account multicriteria decision-making.

The morphometric, hydrological and NDVI analysis revealed that 38% of 514 km² of area of the studied basin has a priority of high hydrological

restoration, 23% average and 39% low, considering for the calculation of NDVI, the months of September and October of the years 2017 and 1996 respectively, with an average precipitation between 56 and 78 mm (NOAA, 2019).

Keywords: Conservation, watershed, morphometry, NDVI, precipitation, remote sensing.

3.2 Introducción

La cuenca o cuenca de drenaje también se puede describir como un sistema abierto y se considera un elemento fundamental en el análisis de una parte del ciclo hidrológico. Es un sistema en el que los insumos provenientes de la precipitación se someten al proceso de infiltración, percolación y escorrentía superficial, por lo que proceden como producto en forma de evapotranspiración (la pérdida de agua directamente del suelo, el agua, la superficie y la vegetación) (Udoka et al., 2016).

Las cuencas de drenaje son las unidades fundamentales para comprender las características geométricas del paisaje fluvial, como la topología de las redes de arroyos y la descripción cuantitativa de la textura, el patrón, la forma y las características de relieve del drenaje. El análisis morfométrico es una técnica importante para evaluar y comprender el comportamiento del sistema hidrológico. El análisis del drenaje basado en parámetros morfométricos es muy importante para la planificación de cuencas hidrográficas, ya que da una

idea de las características de la cuenca en términos de pendiente, topografía, condición del suelo, características de escorrentía, potencial de agua superficial, etc. (Rais & Javed, 2014).

El análisis morfométrico de la cuenca de drenaje y la red de canales desempeñan un papel vital en la comprensión del comportamiento hidrogeológico de la cuenca de drenaje y expresan el clima, la geología, la geomorfología y las estructuras prevalecientes (Wilson, Chandrasear, & Magesh, 2012). El análisis cuantitativo de los parámetros morfométricos es de enorme eficacia en la evaluación de cuencas hidrográficas, la priorización de cuencas hidrográficas para la conservación de suelos y aguas y la gestión de recursos naturales a nivel de cuencas hidrográficas (Snehal & Babar, 2013).

Esta investigación es un intento de combinar los atributos geomorfológicos e hidrológicos de las cuencas de drenaje con la cobertura vegetal obtenida por sensores remotos, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y su cambio en el tiempo, de las subcuencas de la cuenca inicial del río Toachi. Las tecnologías de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica (GIS) se utilizaron de manera productiva con el fin de detectar parámetros morfométricos (Kattimani & Prasad, 2016), hidrológicos y factores ambientales específicos de cobertura del suelo, para evaluar las necesidades potenciales del manejo de las subcuencas estudiadas y proyectar a futuro las estrategias de conservación de suelo y agua.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Ubicación del área de estudio

La cuenca inicial del río Toachi se encuentra en el centro de la provincia de Cotopaxi, donde están dos poblaciones importantes como Zumbahua y Sigchos entre otras. Tiene una superficie de 514 Km², con alturas promedio de 3100 a 3600 msnm (Figura 3.1). La delimitación de la cuenca y subcuencas se realizó con Hydrology de ArcGis, con un modelo digital de elevaciones de 1:5000 (IGM, 2019)⁴, lo que permitió obtener buena precisión en la red de drenaje de 16 subcuencas.

3.3.2 Obtención de información morfométrica

Los valores de área, perímetro, longitud de cauce principal, longitud total de cauces, pendiente del cauce, pendiente, elevaciones, tiempo de concentración, relación de forma, relación de circularidad, coeficiente de compacidad, factor de forma y forma de cuenca, se obtuvieron con Hydrology de ArcGis. Estos datos se usaron para obtener los parámetros morfométricos lineales y de forma de las 16 subcuencas estudiadas, con las ecuaciones propuestas por diferentes autores (Tabla 3.1). Los parámetros lineales y de forma, que permiten evaluar el grado de afectación de

4. Dra. Patricia Garcés. Profesora de Hidrología. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador – ayudó a conseguir el Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio en el Instituto Geográfico Militar.

Tabla 3.1
Fórmulas utilizadas para obtener los parámetros morfométricos de las subcuencas.

Parámetro	Ecuación	Autor	Año
Lineal			
Densidad de drenaje (Km/Km2)	$Dd = \frac{L_{tc}}{A}$	Horton	1945
Densidad hidrográfica (cauces/Km2)	$D_h = \frac{L_u}{A}$	Horton	1945
Textura de drenaje (cauces/Km)	$R_r = \frac{L_u}{P}$	Horton	1945
Longitud de flujo superficial (Km)	$L_y = \frac{1}{2D_d}$	Horton	1945
Tiempo de concentración	$T_c = \frac{526.42 \times b \times L^{1/3}}{(k \times i)^{2/3}}$ $b = \frac{0.0000276 \times i + C_r}{S^{1/3}}$	Izzard	1946
De forma			
Relación de elongación	$R_e = \frac{2}{L_c} \times \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$	Schumn	1956
Relación de circularidad	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	Miller	1953
Coefficiente de compacidad	$C_c = 0.2821 \frac{P}{A^{0.5}}$	Gravelius	1914
Factor de forma	$R_f = \frac{A}{L_c^2}$	Horton	1932
Forma de la cuenca	$B_s = \frac{L_c^2}{A}$	Horton	1932

los suelos por los sistemas de drenaje, se analizaron con estadísticas descriptivas (mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación) para conocer la variabilidad de cada una de las áreas de drenaje (López, Martínez, & Fernández, 2015).

La priorización de subcuencas utilizando el análisis morfométrico se basa en asignar valores enteros ascendentes a cada parámetro calculado (Biswas, Sudhakar, & Desai, 1999). Los parámetros lineales: densidad de drenaje (D_d), densidad hidrográfica (D_h), textura de drenaje (R_t), longitud de flujo (L_g), tienen una relación directa con la afectación. Por tanto, el valor más alto se le asignó el valor de 1; al siguiente valor en orden descendente se le asignó el valor de 2 y así sucesivamente. Los parámetros de forma, como: relación de elongación R_e , relación de circularidad (R_c), coeficiente de compacidad (C_c), factor de forma (R_f), y forma de la cuenca (B_s), tienen una relación inversa con la afectación; por tanto, el valor más bajo se le asignó el valor de 1; al siguiente valor se le asignó el valor de 2 en orden ascendente (López et al., 2015).

3.3.3 Obtención de precipitaciones históricas

Los datos escasos de los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI) en la zona de estudio, se completan con los datos de la agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), cuyas actividades se centran en las condiciones de los océanos y la atmósfera.

Para definir la precipitación de la zona de estudio se realizó un análisis estadístico de datos climatológicos mensuales, entre los años 1901 y 2013 (NOAA, 2019); y las precipitaciones de la estación Pilaló de código M0122, entre los años 1991 y 2015 (INAMHI, 2019).

3.3.4 Obtención del NDVI

El NDVI refleja el contenido de clorofila de las plantas, las variaciones temporales de NDVI son compatibles con las variaciones de humedad del ambiente (Szymula, 2014). A pesar del buen grado de correlación que tiene con la lluvia y humedad del suelo, la señal de NDVI se retrasa respecto al momento en que llueve y parece mostrar mejor relación con el contenido de agua acumulada en el suelo, que con la lluvia caída directamente (CEDEX, 2013)

Para calcular el NDVI se usó imágenes de los satélites LandSat 5 TM del 12-10-1996 y LandSat 8 OLI del 20-9-2017 (USGS, 2019). Los valores de NDVI se obtuvieron utilizando la ecuación [1] para ambas imágenes, las mismas que capturan información en longitudes de onda correspondiente al rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR):

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad [1]$$

Para clasificar el NDVI se utilizó los valores propuestos por (Merg et al., 2011) (Tabla 3.2). Los cambios de NDVI para las diferentes fechas se calcularon mediante álgebra de mapas.

Analizando los pixeles se definió: la superficie para cada tipo de vegetación (NA, SV, VI, VII Y VIII) y para cada subcuenca. El porcentaje de cambio de superficie se estimó con la ecuación [2] (López et al., 2015).

$$PCS_n = \frac{((SNDVI_{2017})-(SNDVI_{1996}))n}{St_n} \times 100 \quad [2]$$

Donde PCS_n es el porcentaje de cambio de superficie por cada vegetación por subcuenca (%); $((SNDVI_{2017}$ y $SNDVI_{1996}))_n$ es la diferencia de área de cada vegetación entre los años 2017 y 1996 para cada subcuenca; St_n es la superficie de cada subcuenca.

Tabla 3.2
Clasificación de vegetación - valores NDVI.

DESDE	HASTA	CLASIFICACION	VALOR
-0.33	0.01	Nubes y agua (NA)	<0.01
0.01	0.10	Suelo sin vegetación (SV)	0.01-0.10
0.10	0.20	Vegetación débil (VI)	0.10-0.20
0.20	0.40	Vegetación escasa (VII)	0.20-0.40
0.40	0.76	Vegetación densa (VIII)	>0.40

La priorización de subcuencas utilizando NDVI se realizó de acuerdo a los siguientes criterios (López et al., 2015):

- a) No se consideró los valores de nubes y agua.
- b) Los NDVI de SV y VI, tienen una relación directa sobre la degradación del suelo; valores mayores de esta variable son más importantes. Por tanto, el valor más alto se le asignó el valor de 1; al siguiente valor en orden descendente se le asignó el valor de 2 y así sucesivamente.
- c) Los NDVI de VII y VIII, tienen una relación inversa sobre la degradación del suelo; valores menores tienen mayor impacto sobre la degradación del suelo y son más importantes. Por tanto, el valor más bajo se le asignó el valor de 1; al siguiente valor se le asignó 2 y así en orden ascendente.

3.3.5 Priorización de subcuencas de intervención

Los indicadores morfométricos y NDVI se clasificaron en función del grado de afectación que tienen sobre la degradación de suelos; estos valores se promediaron para alcanzar: un parámetro compuesto para morfometría (PC_m), un parámetro compuesto para NDVI (PC_{NDVI}) y un parámetro compuesto para un grupo, llamado grado de prioridad de grupo (GP_g), que relaciona PC_m y PC_{NDVI} ; luego se clasificaron de menor a mayor

valor, considerando intervalos de clase (Tabla 3.3) (López et al., 2015).

Tabla 3.3
 Clasificación y grado de intervención
 por subcuenca según: sólo morfometría, sólo NDVI y
 morfometría y NDVI juntos.

Morfometría		NDVI		Morfometría y NDVI	
Intervalos de clase	GP _m [‡]	Intervalos de clase	GP _{NDVI} [‡]	Intervalos de clase	GP _g [£]
1 - 7	Alto	1 - 4	Alto	1 - 6	Alto
8 - 11	Medio	5 - 8	Medio	7 - 11	Medio
12 - 15	Bajo	9 - 12	Bajo	12 - 16	Bajo

[‡] grado de prioridad morfométrico

[‡] grado de prioridad NDVI

[£] grado de prioridad morfométrico y NDVI

3.4 Resultados y análisis

Utilizando Hydrology de ArcGis se delimitó 16 subcuencas y el orden de corrientes de la cuenca inicial del río Toachi (Figura 3.2).

3.4.1 Análisis morfométrico

En la Tabla 3.4 se observa que las áreas de las subcuencas varían entre 17.3 y 46.96 Km², con un coeficiente de variación de 32.77%, con perímetros promedio de 19

Km, longitudes de cauce principal entre 2.2 y 13.31 Km, longitudes totales de cauces entre 100.92 y 355.94 Km, pendientes medias de los cauces que varían entre 1.81 y 12.43% y con pendientes medias de las subcuencas entre 29.45 y 54.29%, lo que indica que tenemos subcuencas con características variadas, asociadas con la degradación de los suelos y la escorrentía superficial aportante a la corriente principal.

Los parámetros morfométricos se agruparon en lineales, aquellos que requieren información de las corrientes, y los de forma que requieren el área y perímetro de las subcuencas (Tabla 3.5).

Densidad de drenaje (D_d)

La densidad de drenaje es la longitud total de las corrientes de todos los órdenes dividida por el área de la cuenca de drenaje (Horton, 1932) (Horton, 1945). La densidad de drenaje se define como la proximidad del espaciado de los canales. El gradiente de la pendiente y el alivio relativo son el principal factor morfológico de la densidad de drenaje (Wilson et al., 2012). Según (Horton, 1945), una D_d igual a 3, es una prevalencia de estratos permeables, vegetación densa y bajo relieve. La D_d inferior a 2 indica una textura muy gruesa, entre 2 y 4 es gruesa, entre 4 y 6 es moderada, entre 6 y 8 es fina y mayor a 8 es una textura de drenaje muy fina (Rais & Javed, 2014).

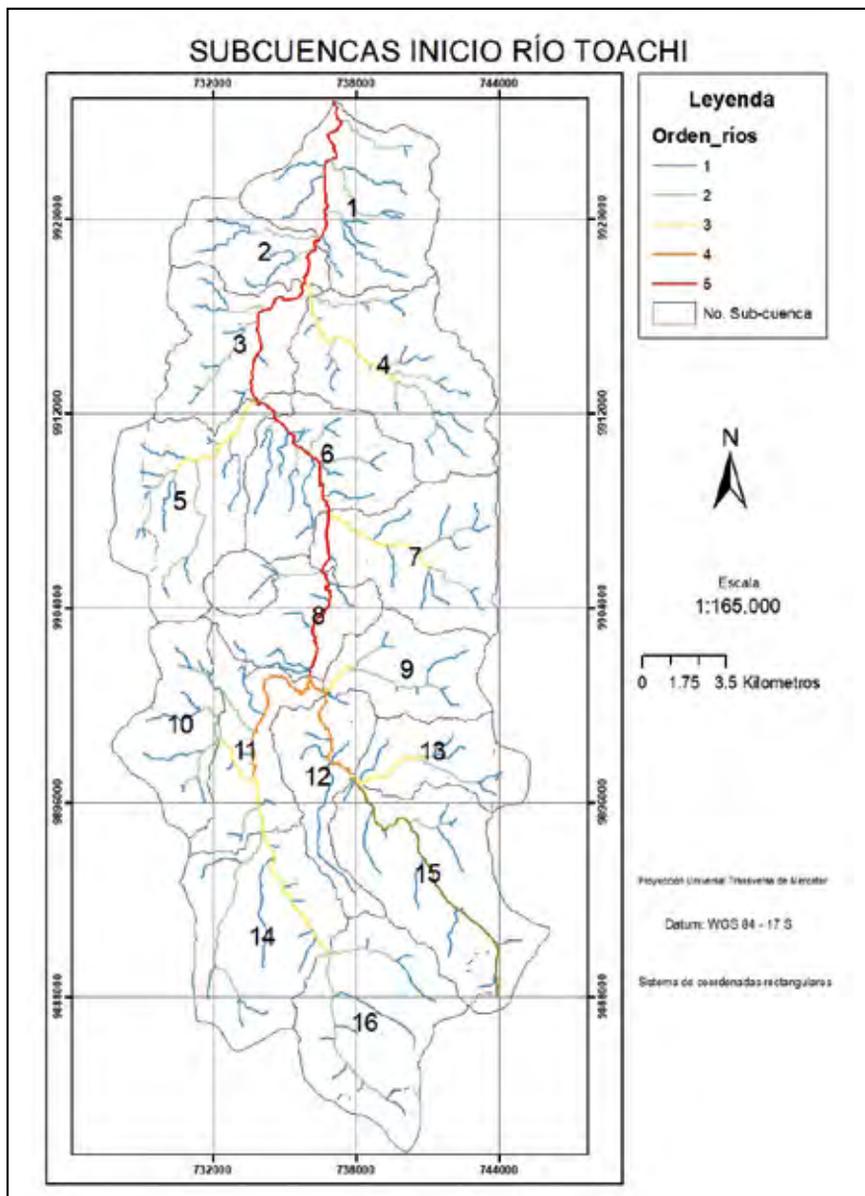


Figura 3.2 Orden de corrientes de ríos y subcuencas de la cuenca hidrográfica inicial del río Toachi.

Referencia: (Farhan, Anbar, Enaba, & Al-Shaikh, 2015, p. 464)

Tabla 3.4
Parámetros dimensionales de las subcuencas analizadas.

Subcuenca	Área		Perímetro	Longitud del cauce principal		Longitud total de cauces		Pendiente del cauce	Pendiente cuenca	Altura máxima cuenca	Altura mínima cuenca	Longitud de cauce	Tempo de concentración
	A Km ²	P Km	Lc Km	Lp Km	Ltc Km	Sc %	S %	Hmax m	Hmin m	L m	Tc (i=20mm/hr) Horas		
1	40.21	29.28	7.00	250.96	2.29	54.29	2380.00	7000.00	2.90				
2	17.30	20.88	2.20	100.92	2.27	53.68	2580.00	2200.00	1.98				
3	29.11	29.83	6.94	176.39	2.65	52.10	2740.00	6800.00	2.91				
4	44.92	33.34	11.12	281.25	12.43	46.43	4000.00	11100.00	3.56				
5	40.03	37.90	11.47	256.47	8.95	52.61	3800.00	11400.00	3.45				
6	31.98	27.27	5.46	219.19	3.90	46.02	3000.00	5900.00	2.90				
7	36.16	29.35	8.86	242.55	9.09	40.85	3800.00	8800.00	3.44				
8	20.49	25.42	5.56	158.12	2.97	44.10	3240.00	5550.00	2.88				
9	22.00	22.92	8.14	144.55	6.34	38.54	3800.00	8200.00	3.43				
10	24.53	25.43	4.74	173.59	7.47	30.84	3860.00	4550.00	3.03				
11	24.87	33.70	10.51	180.59	1.81	41.09	3430.00	10500.00	3.64				
12	20.41	28.95	10.40	138.46	7.12	38.20	4030.00	10400.00	3.72				
13	19.78	24.01	7.85	139.43	7.59	29.45	3980.00	7900.00	3.70				
14	42.37	29.13	6.98	302.07	5.21	43.20	3790.00	7000.00	3.13				
15	46.96	35.05	13.31	334.77	7.07	36.65	4320.00	13300.00	4.10				
16	42.23	30.63	8.50	355.94	3.94	41.15	4115.00	8500.00	3.39				
Min	17.30	20.88	2.20	100.92	1.81	29.45	2540.00	2200.00	1.98				
Max	46.96	37.90	13.31	355.94	12.43	54.29	4320.00	13300.00	4.10				
Xmed	31.46	28.94	8.07	215.95	5.69	43.08	3564.06	8068.75	3.26				
σ	10.31	4.59	2.86	76.21	3.06	7.59	571.43	2846.39	0.50				
CV	32.77	15.87	35.48	35.29	53.70	17.63	16.03	13.47	35.28	15.23			

En esta área de estudio el rango de D_d es 5.83 – 8.43, presentando una textura moderada a muy fina lo que demuestra un material del sub-superficie débil o impermeable con vegetación escasa, relieve montañoso y bien drenado (Tabla 5).

Densidad hidrográfica (D_h)

Es una frecuencia de flujo que relaciona el número de flujos de todas las órdenes dentro de una cuenca y el área de la cuenca (A). El alto valor de D_h indica una mayor escorrentía superficial y una superficie de terreno escarpado. D_h depende principalmente de la litología de la cuenca y la textura de la red de drenaje (Wilson et al., 2012). El área de estudio presenta un D_h de 20.37 a 25.76, que demuestra una alta frecuencia de flujo, con condiciones de alto relieve y pendientes pronunciadas.

Textura de drenaje (R_t)

La textura de drenaje (R_t) es el número total de segmentos de flujo de todos los órdenes por perímetro de esa área (Horton, 1945). Es una medida de la cercanía del espaciado de los canales, depende del clima, las precipitaciones, la vegetación, el tipo de suelo y roca, la tasa de infiltración, el alivio y la etapa de desarrollo (Rais & Javed, 2014). La textura de drenaje se clasifica en cinco clases, como muy gruesa (<2), gruesa (2-4), moderada (4-6), fina (6-8), muy fina (> 8) (Wilson et al., 2012). En el área de estudio tenemos valores entre 16.58 y 35.52, lo que demuestra una textura de drenaje muy fina.

Longitud de flujo superficial (Lg)

Es la longitud de agua sobre el suelo antes de que se concentre en canales y arroyos definidos. Es aproximadamente igual al recíproco de la densidad de drenaje (Horton, 1945). Para una comparación de las subcuencas con respecto a la naturaleza de la trayectoria del flujo, Se clasifica en: (1) bajo ($<0.20 \text{ km}^2 / \text{km}$), (2) medio ($0.20\text{--}0.30 \text{ km}^2 / \text{km}$) y (3) alto ($> 0.30 \text{ km}^2/\text{km}$) en el área de estudio. Los valores altos indican la ocurrencia de trayectorias de flujo largas y, por lo tanto, pendientes de terreno suaves, que reflejan áreas de menor escorrentía y más infiltración (Rais & Javed, 2014). Considerando que, los valores de estudio están entre 0.06 y 0.09, revelan trayectorias de flujo cortas, con pendientes pronunciadas del terreno, reflejando las áreas asociadas con más escorrentía y menor infiltración (Tabla 3.5).

Relación de elongación (Re)

Es la relación entre el diámetro del círculo de la misma área de la subcuenca de drenaje y la longitud de la cuenca principal (López, A., Martínez, M, & Fernández, D., 2015). Una cuenca circular es más capaz de descargar la escorrentía que una cuenca alargada. Estos valores se pueden agrupar en 4 categorías, (a) Círculo (> 0.9), (b) Oval (0.8 a 0.9), (c) Menos alargado (0.7 a 0.8) y (d) Alargada (<0.7) (Snehal & Babar, 2013). La relación de alargamiento Re de la subcuenca del área de estudio es de 0,49 a 2.13, indica subcuencas alargadas y circulares.

Relación de circularidad (R_c)

La relación de circularidad R_c de la cuenca es el área de un círculo que tiene la misma circunferencia que el perímetro de la cuenca. Está influenciado por la longitud y la frecuencia de la corriente, las estructuras geológicas, el uso del suelo, la superficie, el relieve y la pendiente de la cuenca. Es una proporción significativa que indica la etapa dendrítica de una cuenca. Los valores bajos, medios y altos de R_c indican las etapas joven, madura y antigua del ciclo de vida de la cuenca tributaria (Wilson et al., 2012). Los valores > 0.5 sugieren que la cuenca tiene una forma más o menos circular y la cantidad de descarga es comparativamente menor en las subcuencas con valores de R_c más bajos (Rais & Javed, 2014). Los valores de R_c para el estudio están entre 0.28 y 0.63, demuestra que $R_c > 0.5$, son más o menos circulares y $R_c < 0.5$, indica que son menos o más alargados y la cantidad de descarga es menor.

Coefficiente de compacidad (C_c)

Relaciona el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia de área igual a la de la cuenca. Este parámetro es independiente del tamaño de la cuenca y depende sólo de la pendiente. Una cuenca de forma circular es más susceptible a la degradación desde el punto de vista de drenaje, ya que el tiempo de concentración es menor y el gasto pico se presenta en corto tiempo. Campos-Aranda (1998) clasifica el C_c en tres clases: clase I (1.0-1.25), casi redonda a oval-oblonga; clase II (1.26-1.50), oval-redonda

a oval-oblonga), y clase III (de 1.51 a > 2), de oval-oblonga a rectangular-oblonga (López et al., 2015).

Los valores de C_c para el presente estudio variaron entre 1.26 y 1.91; por lo tanto, todas las subcuencas de clase II, indican que se producirá un intermedio (entre menor y mayor) tiempo de concentración antes de que se produzca el flujo máximo en la cuenca y las subcuencas de clase III, indican que se producirá un mayor tiempo de concentración antes de que se produzca el flujo máximo en la cuenca en el cauce principal. El tiempo de concentración calculado es de 2 a 4 horas para 20 mm/hora de precipitación (Tabla 4).

Factor de forma (R_f)

Según (Horton, 1932), el factor de forma (R_f) se puede definir, como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de la cuenca. El valor del factor de forma siempre sería mayor que 0,78 para una cuenca perfectamente circular. Cuanto menor sea el valor del factor de forma, más alargada será la cuenca (Rais & Javed, 2014). En el presente estudio, R_f varía de 0.19 a 3.58, lo que indica que el presente estudio presenta subcuencas alargadas y circulares.

3.4.2 Forma de la cuenca (B_s)

Según (Horton, 1945) la forma de la cuenca es la relación que existe entre la longitud del cauce principal al cuadrado y el área de la cuenca. Este parámetro indica el

Tabla 3.5
Parámetros morfométricos de las subcuencas analizadas

Subcuenca	Parámetros lineales						Parámetros de forma					
	D _d	D _h	R _v	L _v	R _c	R _s	R _c	R _c	C _c	R _f	B _s	
1	6.24	20.91	28.71	0.08	1.02	0.59	1.30	0.82	1.22			
2	5.83	22.15	18.35	0.09	2.13	0.50	1.42	3.58	0.28			
3	6.06	21.49	20.97	0.08	0.88	0.41	1.56	0.60	1.65			
4	6.26	22.21	29.92	0.08	0.68	0.51	1.40	0.36	2.75			
5	6.41	20.37	21.51	0.08	0.62	0.35	1.69	0.30	3.29			
6	6.85	22.13	25.94	0.07	1.17	0.54	1.36	1.07	0.93			
7	6.71	23.08	28.43	0.07	0.77	0.53	1.38	0.46	2.17			
8	7.72	22.63	18.24	0.06	0.92	0.40	1.58	0.66	1.51			
9	6.57	22.87	21.95	0.08	0.65	0.53	1.38	0.33	3.01			
10	7.08	21.83	21.06	0.07	1.18	0.48	1.45	1.09	0.92			
11	7.26	23.08	17.03	0.07	0.54	0.28	1.91	0.23	4.44			
12	6.78	23.52	16.58	0.07	0.49	0.31	1.81	0.19	5.30			
13	7.05	24.51	20.19	0.07	0.64	0.43	1.52	0.32	3.12			
14	7.13	24.25	35.28	0.07	1.05	0.63	1.26	0.87	1.15			
15	7.13	23.43	31.38	0.07	0.58	0.48	1.44	0.27	3.77			
16	8.43	25.76	35.52	0.06	0.86	0.57	1.33	0.58	1.71			
Min	5.83	20.37	16.58	0.06	0.49	0.28	1.26	0.19	0.28			
Max	8.43	25.76	35.52	0.09	2.13	0.63	1.91	3.58	5.30			
Xmed	6.84	22.76	24.44	0.07	0.89	0.47	1.49	0.73	2.33			
σ	0.65	1.37	6.34	0.01	0.40	0.10	0.18	0.81	1.41			
CV	9.49	6.03	25.95	9.14	45.00	21.39	12.28	110.65	60.64			

resultado directo de la evolución del sistema de drenaje en una cuenca en particular y debe ser analizado tomando en consideración los valores de los parámetros como factor de forma, relación de circularidad y relación de elongación (López et al., 2015). Este parámetro varió entre 1.28 y 5.3, teniendo un coeficiente de variación CV de 61%, definiendo la forma de la cuenca B_s como una variable heterogénea.

3.4.3 Análisis de precipitación y caudales de la cuenca

La precipitación es el factor principal que aporta a la escorrentía. La época de lluvias influye en la escorrentía superficial de la cuenca que depende de la distribución de sus formas hidrográficas (Esper & Perucca, 2014).

Las mayores precipitaciones se dan en los meses de enero a abril y las menores en los meses de julio y agosto, con una precipitación promedio mensual de 109 mm. (Figura 3.3).

En el análisis estadístico de las Figura 3.3 y Figura 3.4, podemos observar una disminución promedio mensual de 23mm. entre los meses de diciembre a marzo y un aumento promedio mensual de 17mm. de abril a noviembre entre NOAA y Pilaló (INAMHI, 2019). La media anual de precipitación disminuye de 110 a 105mm. respectivamente.

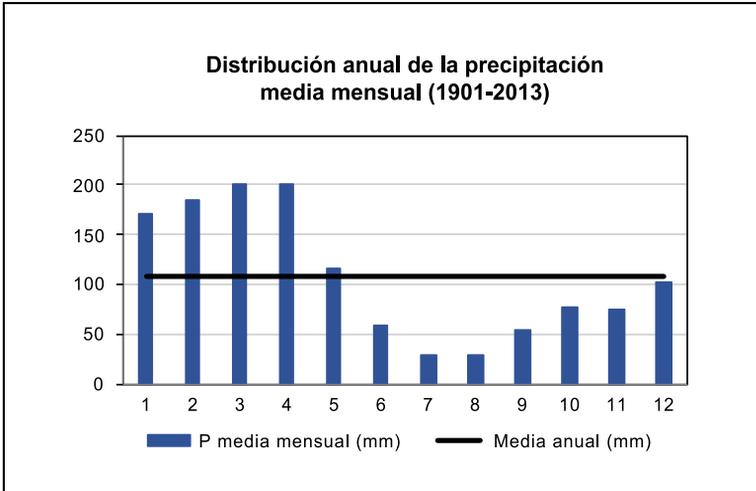


Figura 3.3 Precipitación histórica mensual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013. **Fuente:** (NOAA, 2019).

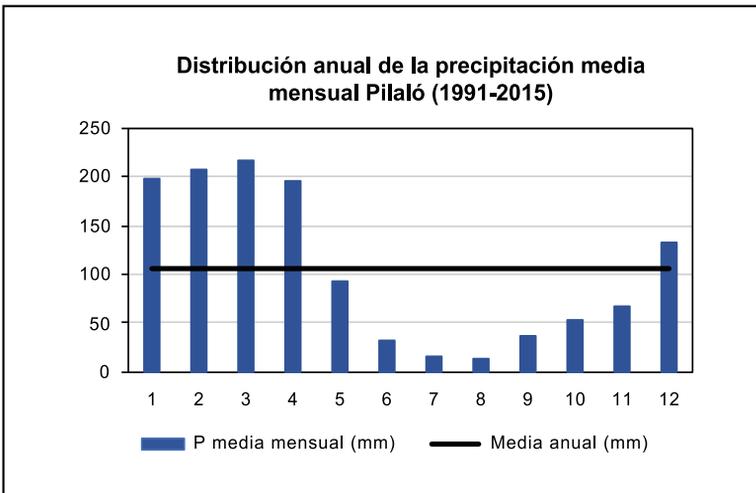


Figura 3.4 Precipitación histórica mensual, Pilaló años 1991-2015. **Fuente:** (INAMHI, 2019).

Considerando el cálculo de NDVI para el año 1996, la precipitación anual es de 1221 mm. menor a la precipitación anual promedio de 1307 mm. Los años con mayor precipitación son: 1913 con 1818 mm, 1997 con 1990 mm. y 1983 con 2078 mm. Los años con menor precipitación son: 1946 con 765 mm. y 1985 con 850 mm. (Figura 3.5).

En la Tabla 3.6, tenemos los caudales de cada subcuenca, utilizando una intensidad máxima a 50 años de 0.125 mm/hr; con una media de 507.7 Lt/seg en las 16 cuencas.

3.4.4 Áreas de intervención (subcuencas) basada en análisis morfométrico

Utilizando los parámetros morfométricos, se obtuvo un valor promedio llamado parámetro compuesto (PC_m). Para ordenar las subcuencas se asignó el valor de 1 a PC_m menor; al siguiente valor se le asignó 2 y así en orden ascendente, dando un nivel de priorización (NP_m) y se definió los grados de priorización (GP_m), alto, medio y bajo (Tabla 3.7).

Los grados de prioridad están relacionados con el orden de intervención morfométrica de las subcuencas, ocho tienen un grado de prioridad alta con el 40% del área total de la cuenca, cuatro tienen un grado de prioridad media con el 25% y cuatro tienen un grado de prioridad bajo con el 35%.

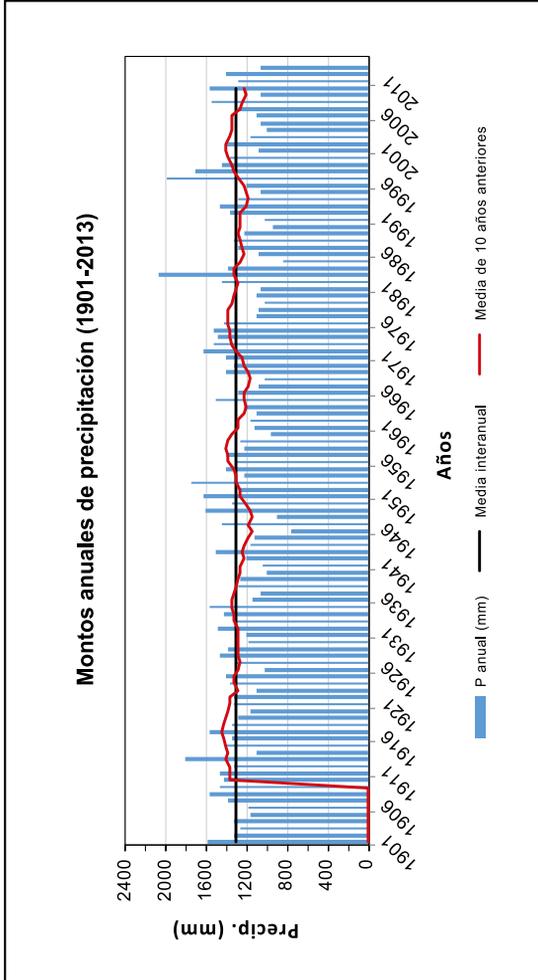


Figura 3.5 Precipitación histórica anual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013.
Fuente: (NOAA, 2019).

Tabla 3.6
Caudal de cada subcuenca

Subcuencas	Caudal
	Q_{\max} 50años
No.	Q ($i=0.125$ mm/hr)
	Lt/seg
1	648.1
2	249.7
3	432.4
4	766.4
5	625.8
6	513.1
7	633.1
8	318.4
9	395.2
10	395.3
11	364.1
12	340.6
13	353.4
14	623.5
15	833.0
16	631.5
Min	249.7
Max	833.0
Xmed	507.7
Desv	174.5
CV	2.9

Elaboración: propia, Referencia: (Azagra, 2006, p. 16)

Tabla 3.7
Grados de prioridad de intervención por subcuenca

Subcuenca	Parámetros lineales					Parámetros de forma						PC _m	NP _m	GP _m
	D _d	D _h	R _t	L _g	R _e	R _c	C _c	R _f	B _s					
1	6.24	20.91	28.71	0.08	1.02	0.59	1.30	0.82	1.22	1.22	6.77	10	Medio	
2	5.83	22.15	18.35	0.09	2.13	0.50	1.42	3.58	0.28	0.28	6.04	2	Alto	
3	6.06	21.49	20.97	0.08	0.88	0.41	1.56	0.60	1.65	1.65	5.97	1	Alto	
4	6.26	22.21	29.92	0.08	0.68	0.51	1.40	0.36	2.75	2.75	7.13	12	Bajo	
5	6.41	20.37	21.51	0.08	0.62	0.35	1.69	0.30	3.29	3.29	6.07	3	Alto	
6	6.85	22.13	25.94	0.07	1.17	0.54	1.36	1.07	0.93	0.93	6.68	9	Medio	
7	6.71	23.08	28.43	0.07	0.77	0.53	1.38	0.46	2.17	2.17	7.07	11	Medio	
8	7.72	22.63	18.24	0.06	0.92	0.40	1.58	0.66	1.51	1.51	5.97	1	Alto	
9	6.57	22.87	21.95	0.08	0.65	0.53	1.38	0.33	3.01	3.01	6.37	7	Alto	
10	7.08	21.83	21.06	0.07	1.18	0.48	1.45	1.09	0.92	0.92	6.13	6	Alto	
11	7.26	23.08	17.03	0.07	0.54	0.28	1.91	0.23	4.44	4.44	6.09	4	Alto	
12	6.78	23.52	16.58	0.07	0.49	0.31	1.81	0.19	5.30	5.30	6.12	5	Alto	
13	7.05	24.51	20.19	0.07	0.64	0.43	1.52	0.32	3.12	3.12	6.43	8	Medio	
14	7.13	24.25	35.28	0.07	1.05	0.63	1.26	0.87	1.15	1.15	7.97	14	Bajo	
15	7.13	23.43	31.38	0.07	0.58	0.48	1.44	0.27	3.77	3.77	7.62	13	Bajo	
16	8.43	25.76	35.52	0.06	0.86	0.57	1.33	0.58	1.71	1.71	8.31	15	Bajo	

3.4.5 Priorización de las subcuencas basada en el cambio de superficie ocupada por valores NDVI

Analizando los píxeles se agrupó zonas con diferente NDVI de acuerdo con la Tabla 2. Se obtuvo los tipos de vegetación y su porcentaje en relación con el área de cada subcuenca para los años 1996 y 2017 (Tabla 3.8 y Tabla 3.9).

Los cambios en la vegetación (NDVI) de los años 1996 y 2017, permitió conocer aumentos o disminuciones porcentuales de cobertura vegetal. Las mayores variaciones fueron: una disminución promedio de 10.73% para SV y un aumento promedio de 19.55% para VII. Para la priorización de la diferencia de cambio en la cobertura vegetal en función de NDVI, se obtuvo un valor promedio llamado parámetro compuesto (PC_{NDVI}). Para ordenar las subcuencas se asignó el valor de 1 a PC_{NDVI} menor; al siguiente valor se le asignó 2 y así en orden ascendente, dando un nivel de priorización (NP_{NDVI}) y se definió los grados de priorización (GP_{NDVI}), alto, medio y bajo (Tabla 3.10). Seis subcuencas con el 38% del área de la cuenca tienen un grado de prioridad alto, cinco con el 30% tienen un grado de prioridad medio y cinco con el 32% tienen un grado de prioridad bajo.

Tabla 3.8
 Área de las subcuencas en función de la clasificación NDVI para el 12-10-1996.

Subcuenca	1		2		3		4		5		Superficie total	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1	0.00	0.00	39.29	0.98	944.04	23.49	2863.02	71.25	172.20	4.29	4018.55	
2	0.45	0.03	7.36	0.43	166.30	9.61	1309.35	75.66	247.08	14.28	1730.53	
3	2.51	0.09	28.74	0.99	326.38	11.22	2397.72	82.39	154.78	5.32	2910.13	
4	0.09	0.00	6.50	0.14	285.42	6.36	3678.16	81.90	520.98	11.60	4491.15	
5	5.31	0.13	207.48	5.19	1470.30	36.75	2050.96	51.26	267.24	6.68	4001.29	
6	44.71	1.40	338.14	10.58	944.89	29.57	1663.95	52.07	203.87	6.38	3195.55	
7	19.56	0.54	191.77	5.30	1028.94	28.43	2130.14	58.86	248.56	6.87	3618.96	
8	106.23	5.19	584.96	28.56	1016.11	49.61	338.38	16.52	2.58	0.13	2048.27	
9	5.45	0.25	357.51	16.25	1077.71	48.98	694.94	31.59	64.48	2.93	2200.09	
10	2.10	0.09	839.97	34.24	943.12	38.44	659.06	26.86	9.26	0.38	2453.52	
11	73.95	2.98	1115.11	44.88	1069.21	43.04	221.42	8.91	4.83	0.19	2484.51	
12	42.58	2.09	378.70	18.57	1127.15	55.28	439.84	21.57	50.72	2.49	2038.98	
13	0.79	0.04	45.56	2.31	539.51	27.31	629.20	31.85	760.53	38.50	1975.59	
14	1.96	0.05	348.35	8.22	1551.13	36.62	2019.51	47.68	314.32	7.42	4235.27	
15	0.24	0.01	94.02	2.00	760.84	16.22	2144.18	45.70	1692.70	36.08	4691.97	
16	0.97	0.02	41.43	0.98	246.98	5.85	2459.75	58.26	1472.76	34.88	4221.88	

Tabla 3.9
 Área de las subcuencas en función de la clasificación NDVI para el 20-9-2017

Subcuenca	1		2		3		4		5		Superficie total	
	NA		SV		VI		VII		VIII		ha	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1	0.00	0.00	5.85	0.15	141.93	3.53	3389.40	84.35	481.23	11.98	4018.41	
2	0.09	0.01	0.82	0.05	35.33	2.04	1436.11	82.99	258.06	14.91	1730.41	
3	0.00	0.00	3.90	0.13	59.68	2.05	2627.10	90.24	220.40	7.57	2911.09	
4	0.00	0.00	6.40	0.14	118.68	2.64	4018.41	89.46	348.48	7.76	4491.97	
5	0.06	0.00	25.99	0.65	285.53	7.14	3340.07	83.46	350.13	8.75	4001.77	
6	0.18	0.01	15.84	0.50	438.00	13.71	2656.47	83.14	84.76	2.65	3195.25	
7	0.00	0.00	9.51	0.26	726.44	20.07	2703.84	74.71	179.51	4.96	3619.30	
8	0.00	0.00	37.86	1.85	940.34	45.89	1070.24	52.23	0.58	0.03	2049.02	
9	0.00	0.00	5.43	0.25	1179.27	53.61	982.92	44.68	32.16	1.46	2199.79	
10	0.00	0.00	8.54	0.35	1162.59	47.39	1275.33	51.98	6.88	0.28	2453.34	
11	0.00	0.00	17.34	0.70	1510.66	60.80	950.29	38.25	6.17	0.25	2484.46	
12	0.00	0.00	23.98	1.18	1022.69	50.19	960.83	47.15	30.30	1.49	2037.80	
13	0.00	0.00	0.88	0.04	459.45	23.25	983.68	49.79	531.75	26.91	1975.77	
14	0.06	0.00	38.78	0.92	1150.45	27.16	2733.62	64.54	312.70	7.38	4235.61	
15	0.00	0.00	2.88	0.06	413.55	8.81	3291.52	70.16	983.58	20.97	4691.52	
16	0.00	0.00	27.30	0.65	250.07	5.92	2870.51	68.00	1073.31	25.43	4221.90	

Tabla 3.10
 Diferencia del cambio de superficie en las subcuencas con el cambio de NDVI y grados
 de priorización entre los años 1996 y 2017.

Subcuenca	Diferencia del cambio de superficie						Priorización						PC _{NDVI}	NP _{NDVI}	GP _{NDVI}
	NA	SV	VI	VII	VIII	NA	SV	VI	VII	VIII					
	%	%	%	%	%										
1	0.00	-0.83	-19.96	13.10	7.69	--	4	15	6	16	10.25	8	MEDIO		
2	-0.02	-0.38	-7.57	7.32	0.63	---	3	10	1	13	6.75	4	ALTO		
3	-0.09	-0.85	-9.16	7.88	2.26	---	5	12	3	15	8.75	6	MEDIO		
4	0.00	0.00	-3.71	7.58	-3.84	---	1	6	2	4	3.25	1	ALTO		
5	-0.13	-4.54	-29.61	32.22	2.07	---	8	16	15	14	13.25	12	BAJO		
6	-1.39	-10.09	-15.86	31.06	-3.73	---	11	14	14	5	11.00	10	BAJO		
7	-0.54	-5.04	-8.36	15.85	-1.91	---	9	11	7	6	8.25	5	MEDIO		
8	-5.19	-26.71	-3.70	35.73	-0.10	---	14	5	16	10	11.25	11	BAJO		
9	-0.25	-16.00	4.62	13.09	-1.47	---	12	3	5	7	6.75	4	ALTO		
10	-0.09	-33.89	8.94	25.12	-0.10	---	15	2	11	9	9.25	7	MEDIO		
11	-2.98	-44.18	17.77	29.34	0.05	---	16	1	13	12	10.50	9	BAJO		
12	-2.09	-17.40	-5.12	25.55	-1.00	---	13	8	12	8	10.25	8	MEDIO		
13	-0.04	-2.26	-4.05	17.94	11.58	---	7	7	9	2	6.25	2	ALTO		
14	-0.04	-7.31	-9.46	16.86	-0.04	---	10	13	8	11	10.50	9	BAJO		
15	-0.01	-1.94	-7.40	24.45	-15.11	---	6	9	10	1	6.50	3	ALTO		
16	-0.02	-0.33	0.07	9.73	-9.46	---	2	4	4	3	3.25	1	ALTO		

3.4.6 Priorización de áreas de intervención (subcuencas), considerando morfometría y NDVI

El promedio de los parámetros compuestos de morfometría y NDVI (PC_m y PC_{NDVI}), permite obtener un parámetro compuesto global (PC_g). Al valor menor de PC_g se le asignó el nivel de prioridad global (NP_g) de 1 y así en forma sucesiva, Luego se definieron grados de prioridad (GP_g) de alto, medio y bajo de las subcuencas (Tabla 3.11).

La importancia de esta metodología destaca la prioridad de áreas de restauración hidrológica, considerando la toma de decisiones multicriterio. Las principales subcuencas por intervenir con grado de prioridad alto corresponden a las subcuencas No. 2, 4, 9, 13, 15 y 16 (Figura 3.6).

Tabla 3.11

Priorización de los componentes: morfometría y NDVI.

Subcuenca	PC _m	PC _{NDVI}	P _{cg}	NP _g	GP _g
1	6.77	10.25	8.51	12	Bajo
2	6.04	6.75	6.39	4	Alto
3	5.97	8.75	7.36	7	Medio
4	7.13	3.25	5.19	1	Alto
5	6.07	13.25	9.66	16	Bajo
6	6.68	11.00	8.84	14	Bajo
7	7.07	8.25	7.66	8	Medio
8	5.97	11.25	8.61	13	Bajo
9	6.37	6.75	6.56	5	Alto
10	6.13	9.25	7.69	9	Medio
11	6.09	10.50	8.30	11	Medio
12	6.12	10.25	8.18	10	Bajo
13	6.43	6.25	6.34	3	Alto
14	7.97	10.50	9.23	15	Bajo
15	7.62	6.50	7.06	6	Alto
16	8.31	3.25	5.78	2	Alto

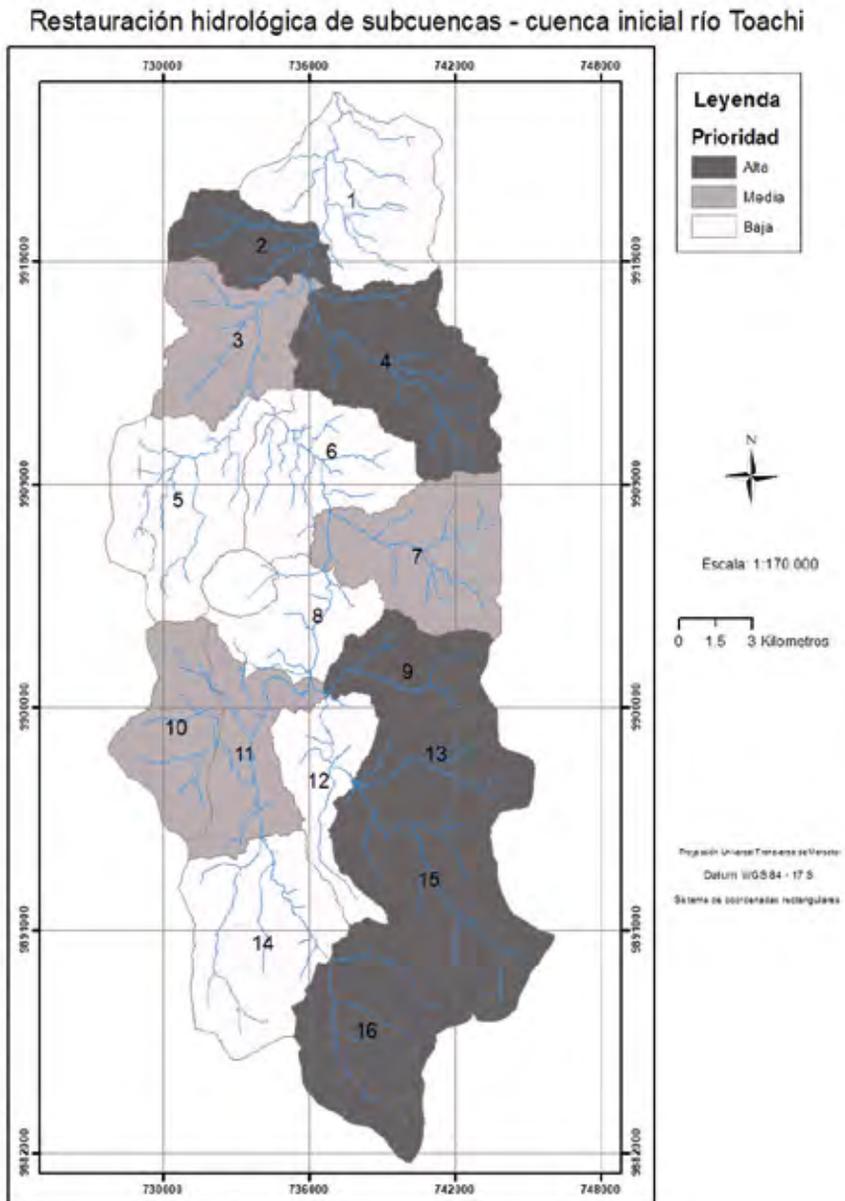


Figura 3.6 Priorización de intervención hidrológica en las subcuencas - cuenca inicial del río Toachi

3.5 Conclusiones

Utilizando los parámetros morfométricos se encuentra que el mayor nivel de degradación de las subcuencas estudiadas se encuentra en la zona central y occidental de la cuenca. En la zona mencionada la erosión fluvial y la geología definen acantilados de más de 200 metros de altura.

Los cambios en la vegetación (NDVI) de los años 1996 y 2017, permitieron conocer que cinco de las seis subcuencas con grado de prioridad de intervención más alto se encuentran al oriente de la cuenca. En la zona tenemos alturas de 3880 a 4320 msnm, con pajonales andinos que hay que proteger.

El análisis morfométrico, hidrológico y NDVI reveló que el 38% de 514 km² de área de la cuenca estudiada tiene una prioridad de restauración hidrológica alta, el 23% una prioridad media y el 39% una prioridad baja.

El estudio de NDVI se lo realizó en los meses de septiembre y octubre de los años 1996 y 2017, con una precipitación promedio de 56 a 78 mm; menor a la precipitación promedio anual de 109 mm. (NOAA, 2019).

3.6 Bibliografía

- Azagra. (2006). *Método de los coeficientes de escorrentía. Marco Generalizado.*
- Biswas, Sudhakar, & Desai. (1999). Prioritisation of Subwatersheds Based on Morphometric Analysis of Drainage Basin: A Remote Sensing and GIS Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155–166.
- CEDEX. (2013). *Elaboración y mantenimiento de un sistema de indicadores hidrológicos y estudios para la identificación y caracterización de sequías.*
- Esper, & Perucca. (2014). Caracterización morfométrica de la cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 235–245.
- Farhan, Anbar, Enaba, & Al-Shaikh. (2015). Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, (7), 456–475.
- Horton. (1932). Drainage Basin characteristics. *Trans. Amer. Geophys.*, (13), 350–361.
- Horton. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach

to Quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56(3), 275–370.

IGM. (2019). *Modelo digital del terreno (MDT)*. Quito.

INAMHI. (2019). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador*. Recuperado de Estación meteorológica M0122 - Pilaló.

Kattimani, & Prasad. (2016). Morphometric Studies on Part North Pennar Basin using Remote Sensing and Geographic Information System Techniques. *International Journal of Advanced Research*, 4(7), 2014–2018. <https://doi.org/10.2147/IJAR01>

López, Martínez, & Fernández. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(1), 121–137.

Merg, Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., ... Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen - Sección Agronomía*, XIII(11), 1–11.

NOAA. (2019). National Oceanic and Atmospheric Administration | U.S. Department of Commerce. Recuperado 24 de abril de 2019, de <https://www.noaa.gov/>

Rais, & Javed. (2014). Drainage characteristics of Manchi basin, Karauli district, Eastern Rajasthan using

- remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 5(1), 104–118.
- Snehal, & Babar. (2013). Morphometric Analysis with Reference to Hydrogeological Repercussion on Domri River Sub-basin of Sindphana River Basin, Maharashtra, India. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 1(1), 29–35. <https://doi.org/10.12691/jgg-1-1-5>
- Szymula. (2014). *Análisis de la evolución de sequías con metodologías de teledetección*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina. (Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos).
- Udoka, Nwankwor, I., Ahirakwen, A., Opara, I., Emberga, T., & Inyang, E. (2016). Morphometric Analysis of Sub-watersheds in Oguta and Environs, Southeastern Nigeria Using GIS and Remote Sensing Data. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 4(2), 21–28. <https://doi.org/10.12691/jgg-4-2-1>
- USGS. (2019). EarthExplorer - Home. Recuperado 25 de abril de 2019, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wilson, Chandrasear, & Magesh. (2012). Morphometric Analysis of Major Sub-Watersheds in Aiyar & Karai Pottanar Basin, Central Tamil Nadu, India Using Remote Sensing & GIS Techniques. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2(Special Issue), 8–15.

Capítulo 4

**Downscaling estadístico,
escenario RCP 8.5, cuenca inicial
del río Toachi – Cotopaxi**

Downscaling estadístico, escenario RCP 8.5, cuenca inicial del río Toachi – Cotopaxi

Statistical downscaling, RCP 8.5 scenario, initial basin of the Toachi River – Cotopaxi

Sánchez, Eddy.⁵

4.1 Resumen

Este estudio pretende entender inicialmente, cómo influirá en el futuro la precipitación en la cantidad de agua de riego, para las comunidades indígenas de la cuenca inicial del río Toachi (superficie 514 Km², alturas entre 3000 a 3600 msnm). Estudios previos para el escenario “pesimista” (RCP 8.5) entre el 2011 y 2100, indican que la precipitación aumentará en promedio entre el 10-20%, para todo el territorio del Ecuador (Porrás, 2015).

5. Área de Geotecnia - Hidráulica y Sanitaria. Profesor de Suelos, Geología, Hidrología. Facultad de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Apartado 17-01-2184, Quito, Ecuador.

Para validar un modelo de precipitación estadístico, se usaron: datos climatológicos observados de National Oceanic & Atmospheric Administration 1901-2013 (NASA, 2017), (NOAA, 2017), estación Pilaló 1991-2015 (INAMHI, 2019), y modelos (RCP 8.5) de precipitación diaria 1900-2100 (IPSL⁶, AORI⁷ y NASA⁸). Obteniendo los mejores resultados con el modelo GIS-E2-R-p1 de NASA, para 20 días de precipitación mensual, que explica el 47.2% de los datos observados; y validado estadísticamente con pruebas de regresión lineal (Precipitación observada = 1.47 Precipitación modelada - 94.93); encontrando en el modelo GIS-E2-R-p1, que la precipitación media aumenta del 20 al 24%, entre los años 2014 y 2100.

Palabras clave: Downscaling, cambio climático, precipitación, cuenca hidrográfica.

Abstract

This study intends to initially understand how precipitation will influence the amount of irrigation water in the future for the indigenous communities of the initial basin of the Toachi River (surface area 514 km², heights

-
6. KNMI Climate Explorer and IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France).
 7. KNMI Climate Explorer and JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanagawa, Japan), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba, Japan), and NIES (National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan).
 8. KNMI Climate Explorer and NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies) New York, NY.

between 3000 to 3600 meters above sea level). Previous studies for the “pessimistic” scenario (RCP 8.5) between 2011 and 2100, indicate that precipitation will increase on average between 10-20%, for the entire territory of Ecuador (Porrás, 2015).

To validate a statistical precipitation model, the following were used: observed climatological data from the National Oceanic & Atmospheric Administration 1901-2013 (NASA, 2017), (NOAA, 2017), Pilaló station 1991-2015 (INAMHI, 2019), and models (RCP 8.5) of daily precipitation 1900-2100 (IPSL, AORI and NASA). Obtaining the best results with the NASA GIS-E2-R-p1 model, for 20 days of monthly precipitation, which explains 47.2% of the observed data; and statistically validated with linear regression tests (Observed precipitation = 1.47 Modeled precipitation - 94.93); finding in the GIS-E2-R-p1 model, that the average precipitation increases from 20 to 24%, between the years 2014 and 2100.

Keywords: Downscaling, climate change, precipitation, river basin.

4.2 Introducción

Esta investigación es un intento de combinar los valores mensuales de precipitación observada (1901-2013) y los valores de precipitación mensual modelada (1900-2100), para encontrar una relación estadística de regresión lineal en la cuenca inicial del río Toachi.

Según (Porras, 2015), los resultados de modelos climáticos para Ecuador, muestran incrementos en las temperaturas de al menos $0,1^{\circ}\text{C}/\text{década}$, así como el incremento de los días y noches calientes y la reducción de los días y noches fríos para el Ecuador. La precipitación muestra incrementos en gran parte de la Sierra, y reducciones en la Costa, el sur y norte de la Sierra y parte de la Amazonía. Así mismo se observan reducciones en el número de días secos consecutivos en el año e incrementos de los eventos extremos asociados a la precipitación para parte de la Sierra y la Amazonía”. Para Precipitación, la tendencia anual es hacia el aumento en la mayor parte del país, siendo los mayores incrementos (superiores a $20\text{ mm}/\text{década}$) en las estaciones ubicadas al este de la Costa, en Sucumbíos y en El Oro; mientras que en las estaciones de Loja y Cotopaxi se aprecia una tendencia hacia la disminución en más de $20\text{ mm}/\text{década}$. Los valores máximos de precipitación en un día también presentan reducciones de $2\text{ mm}/\text{década}$ o más para las estaciones de la franja central del país. En las estaciones de Pichincha, Sucumbíos y Loja, el comportamiento que se presenta es con una tendencia al aumento, con valores entre 2 y $6\text{ mm}/\text{década}$. Por otra parte, los valores máximos de precipitación para 5 días consecutivos muestran un aumento entre 4 y $13\text{ mm}/\text{década}$ para las estaciones del sur de la Sierra, el norte de la Amazonia, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas; mientras que las reducciones son de 4 a $8\text{ mm}/\text{década}$ en las estaciones ubicadas en Manabí, Tungurahua y Carchi.

(Porras, 2016) afirma que: a nivel estacional, para Diciembre-Enero-Febrero, para el periodo 2011-

2100, el escenario pesimista (RCP 8.5), presenta valores de precipitación superiores al 10% en gran parte del territorio nacional, siendo los más altos en la franja central del país. Para Marzo-Abril-Mayo, este incremento sería entre 10-20% en todo el país. En Junio-Julio-Agosto, para el escenario “pesimista” (RCP 8.5), habría incrementos del 20-30% en gran parte del territorio, con zonas en la Sierra y en la Costa en las que estos incrementos son superiores al 30%. Finalmente, para Septiembre-Octubre-Noviembre, bajo el escenario “pesimista” (RCP 8.5), en este trimestre habría reducciones de precipitación del 2-10% en el periodo 2011-2040 hacia el norte, oriente y occidente del país, y desde mitad de siglo, estas reducciones se mantendrían apenas en la parte norte y oriental de la Amazonía, siendo las reducciones más altas (del 10-20%) en el oriente.

Los datos observados en la zona de estudio, se obtuvieron de la agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos: National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, cuyas actividades se centran en las condiciones de los océanos y la atmósfera y se compararon con los datos de la estación Pilaló (INAMHI, 2019). Además se escogieron los tres primeros modelos (IPSL, AORI y NASA) de un estudio de quince, que representan mejor el clima para Ecuador (Porrás et al., 2016).

El estudio pretende entender: ¿Cómo influirá en el futuro la precipitación observada y modelada, en la cantidad de agua de riego para las comunidades indígenas de la cuenca inicial del río Toachi? Las Juntas

de Agua de consumo humano y riego en comunidades indígenas de la zona de estudio, necesitan el apoyo de estudios técnicos, para ordenar el consumo de agua de sus cuencas hidrográficas. La actividad económica principal de estos pueblos es el cultivo y pastoreo. Siendo esta una investigación aplicada.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Ubicación del área de estudio

La cuenca inicial del río Toachi se encuentra en el centro de la provincia de Cotopaxi, donde están dos poblaciones importantes como Zumbahua y Sigchos entre otras. Tiene una superficie de 514 Km², con alturas promedio de 3000 a 3600 msnm (Figura 4.1). El modelo de predicción climática se tomó en los vértices geográficos (-0.67, -78.5 l; -1.1, -78.95) del valle interandino de la provincia de Cotopaxi, Ecuador.

4.3.2 Obtención de precipitaciones observadas

Los datos escasos de los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI) en la zona de estudio, se completan con los datos de la agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos: National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, cuyas actividades se centran en las condiciones de los océanos y la atmósfera.

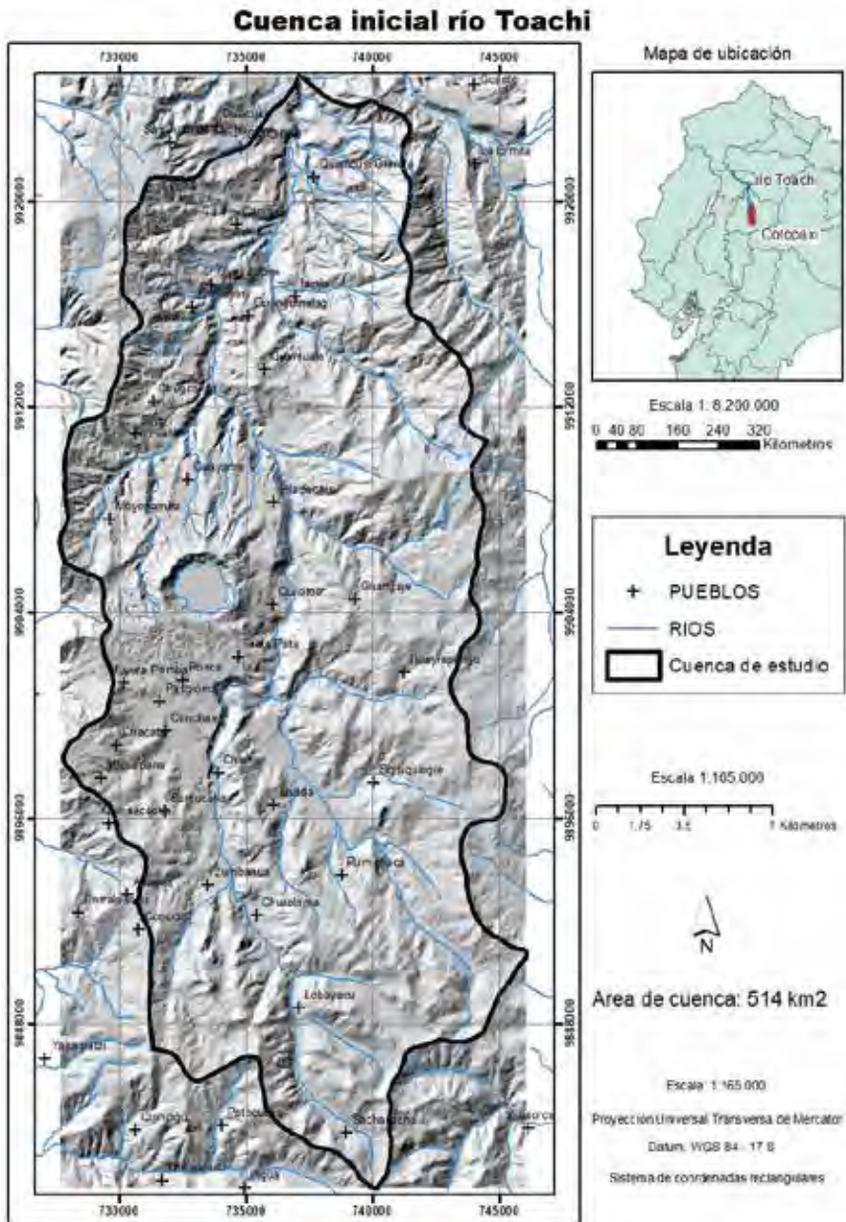


Figura 4.1 Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica inicial del río Toachi

Para definir la precipitación de la zona de estudio se realizó un análisis estadístico de datos climatológicos mensuales, entre los años 1901 y 2013 (NOAA, 2019); y las precipitaciones de la estación Pilaló de código M0122, entre los años 1991 y 2015 (INAMHI, 2019).

4.3.3 Obtención de información de modelos geoes-tadísticos de precipitación

Los valores de área, perímetro, se tomó en los vértices geográficos (-0.67, -78.5 l; -1.1, -78.95) del valle interandino de la provincia de Cotopaxi, Ecuador y se obtuvo las precipitaciones mensuales (mm/día), para los años 1900-2100 de los modelos climáticos de campo: cmip5 y experimento: rcp85 (Tabla 4.1).

4.3.4 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de regresión lineal, entre los datos de precipitación observada y precipitación modelada (1901-2013), utilizando las pruebas mencionadas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1
Modelos utilizados, años 1900 - 2100

Modelo	Institución	Resolución (° de arco)
IPSL-CM5A-MR	KNMI Climate Explorer and IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France)	2.5x2.5352
MIROC-ESM	KNMI Climate Explorer and JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanagawa, Japan), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba, Japan), and NIES (National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan)	2.8125x2.7906
GIS-E2-R-p1	KNMI Climate Explorer and NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies) New York, NY	2.5x2

Tabla 4.2
Pruebas estadísticas de regresión lineal

Autor	Prueba
Pearson's	Correlación producto-momento
t Student de dos muestras	Correlación
Fisher	Correlación
Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)	Normalidad
Studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)	Homocedasticidad
Durbin-Watson (errores autocorrelacionados)	Independencia de variables

4.4 Resultados y análisis

4.4.1 Análisis de precipitación observada

Las mayores precipitaciones se dan en los meses de enero a abril y las menores en los meses de julio y agosto, con una precipitación promedio mensual de 109 mm. (Figura 4.2).

En la Figura 4.3, podemos observar una disminución promedio mensual de 23mm. entre los meses de diciembre a marzo y un aumento promedio mensual de 17mm. de abril a noviembre entre NOAA y Pilaló

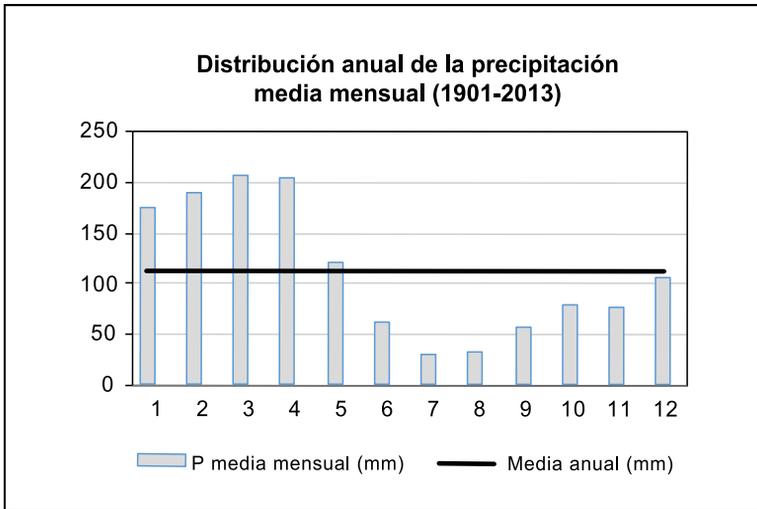


Figura 4.2 Precipitación histórica mensual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013. **Fuente:** (NOAA, 2019).

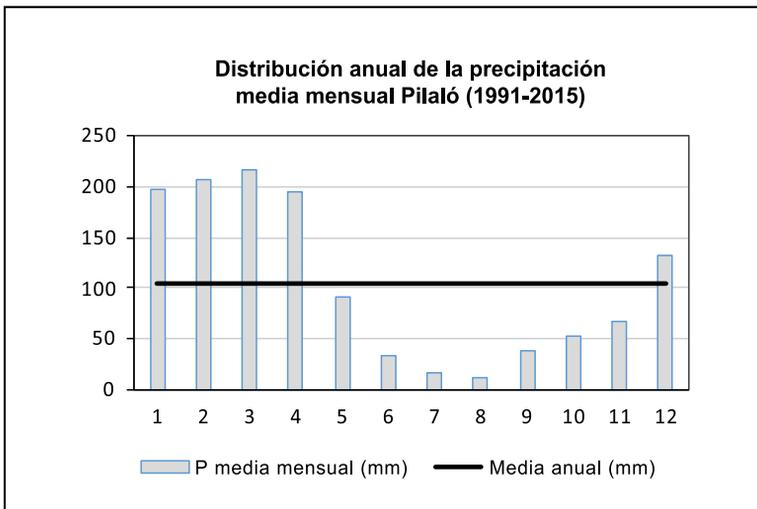


Figura 4.3 Precipitación histórica mensual, Pilaló años 1991-2015. **Fuente:** (INAMHI, 2019).

(INAMHI, 2019). La media anual de precipitación disminuye de 110 a 105mm. respectivamente.

En la Figura 4.4, se observan, mayores variaciones mensuales de precipitación histórica para los meses de enero, febrero, marzo y mayo entre los años 1901 – 2013, con anomalías mayores en marzo, noviembre y diciembre.

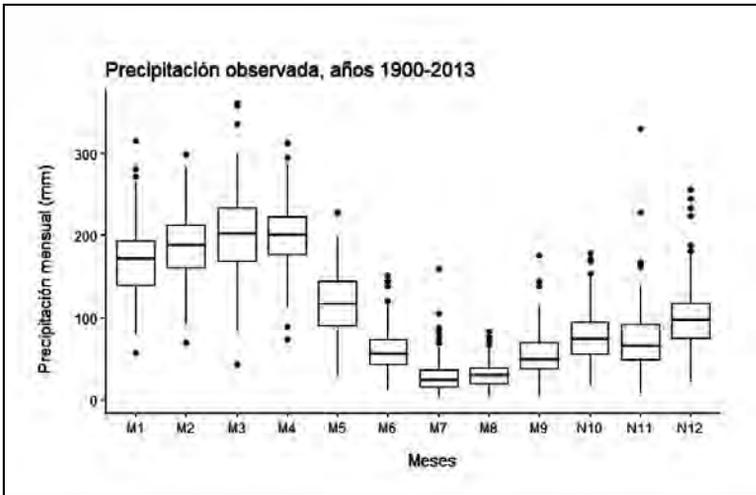


Figura 4.4 Diagrama de caja mensual de la precipitación histórica de la cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013 (NOAA, 2019).

4.4.2 Análisis de modelo de precipitación

Utilizando el parámetro de precipitación para los años 1900 – 2100, y considerando meses de 30 días se obtuvo la Figura 4.5.

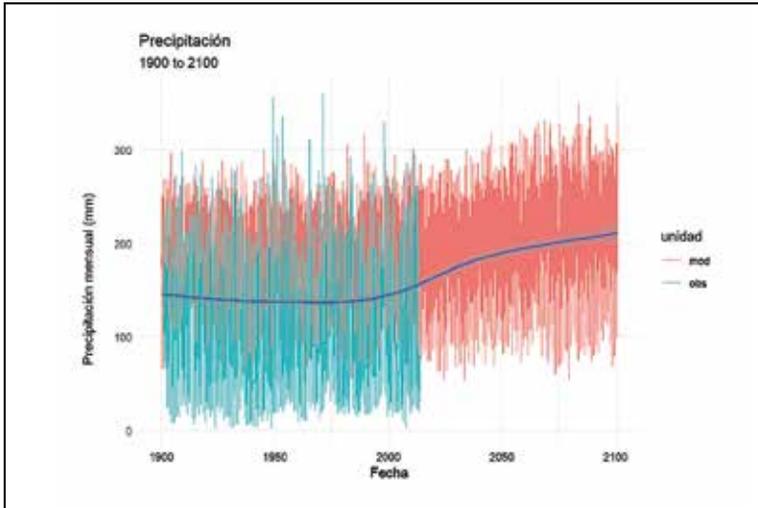


Figura 4.5 Precipitación mensual observada (obs) y modelada a 30 días (mod) para los años 1900 - 2100

Encontrando una variación entre los datos de precipitación observados y modelados se ajustó el modelo a 20 días de precipitación, y se obtuvo una buena relación entre los datos (Figura 4.6).

4.4.3 Análisis estadístico de la relación de precipitación histórica y la precipitación modelada

Los estadísticos principales de la precipitación observada y los tres modelos se observan en la Tabla 4.3:

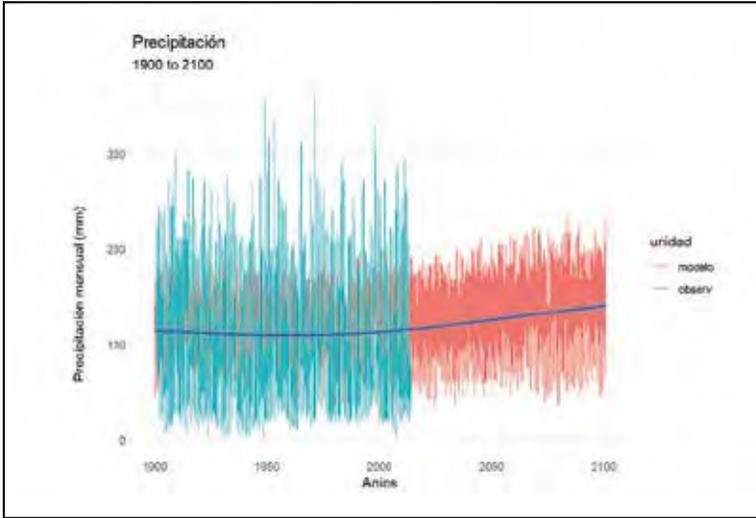


Figura 4.6 Precipitación mensual observada (observ) y modelada a 20 días (modelo) para los años 1900 – 2100.

Tabla 4.3
Estadísticos de precipitación

Estadísticos	Observada	IPSL-CM5A-MR	MI-ROC-ESM	GIS-E2-R-p1
Min.	1.832	30.02	27.4	44.68
1Q	46.743	88.05	77.9	104.53
Median	90.712	118.49	127.9	144.7
Mean	108.915	120.33	116.4	136.03
3Q	169.19	155.42	152	165.43
Max.	360.502	234.05	196.1	205.24

El histograma de frecuencias para la precipitación observada y modelada se tienen en la Figura 4.7.

Relación entre precipitación observada y modelada

Los datos de precipitación observada y precipitación modelada para la zona de estudio entre los años 1901 y 2013 se observan en la Figura 4.8.

Correlación producto-momento Pearson's

En la Tabla 4.4, se observa una correlación mejor ($r = 0.7141$), entre los datos observados y el modelo GIS-E2-R-p1.

Correlación t Student de dos muestras

En la Tabla 4.5, vemos que el modelo GIS-E2-R-p1, explica el 47.2% de los datos observados. Los coeficientes β_0 y β_1 cumplen con la hipótesis alternativa ($2.00E-16 < 0,05$) de ser representativos de la ecuación de regresión lineal (Precipitación observada = 1.47 Precipitación modelada - 94.93).

Correlación de Fisher

En la Tabla 4.6, la correlación de Fisher es mejor para el modelo GIS-E2-R-p1, con un F estadístico de 1210, donde la varianza explicada del modelo de regresión

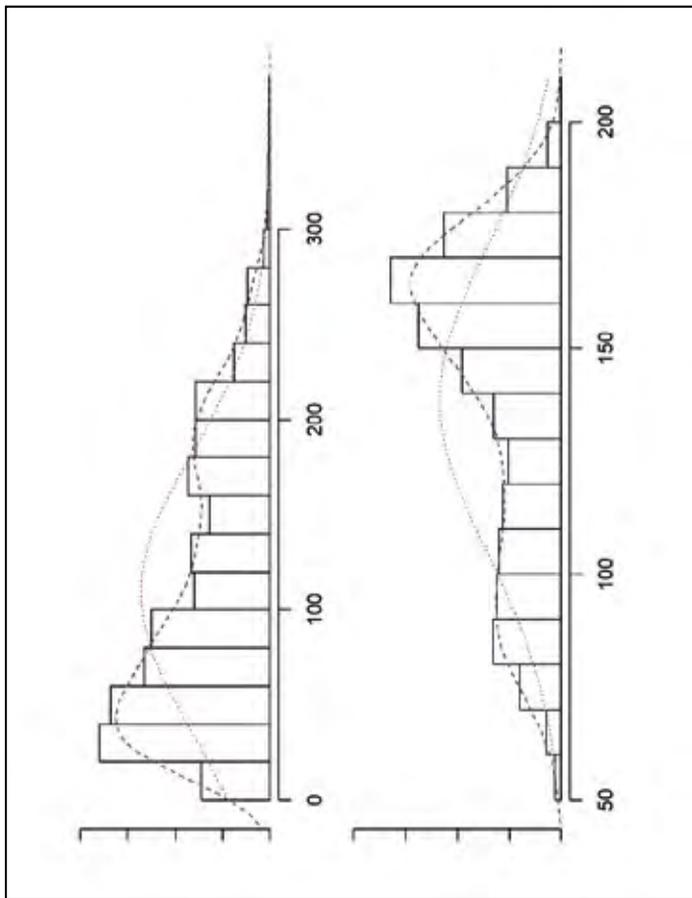


Figura 4.7 Histograma de frecuencia para precipitación observada – modelada (GIS-E2-R-p1); cuenca inicial del río Toachi

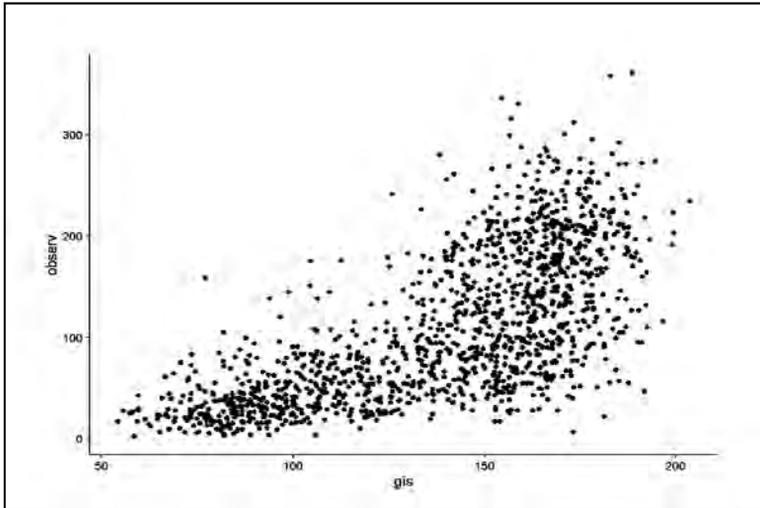


Figura 4.8 Datos de precipitación observada (observ) vs. Modelada (gis = GIS-E2-R-p1) para los años 1901 – 2013; cuenca inicial del río Toachi

es mayor a la varianza (residual) que no puedo explicar con el modelo y cumple la hipótesis alternativa, con 95% de nivel de confianza y 5% de nivel de significación, existiendo diferencia de varianza explicada y no explicada ($2.20E-16 < 0.05$), cumpliendo con otra condición de regresión lineal, en donde el modelo es estadísticamente significativo.

Prueba de Kolmogorov Smirnov

En la Tabla 4.7, se confirma el supuesto de normalidad en los residuos, donde se cumple la hipótesis nula ($0.9182 > 0.05$) para un 5% de nivel de significancia. Gráficamente los cuartiles de los valores residuales

Tabla 4.4
Estadístico Pearson's

Modelo	Correlación producto-momento Pearson's					
	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza		r
				Estimaciones de r		
IPSL-CM5A-MR	16.31	1354	2.20E-16	0.3597	0.4487	0.4052
MIROC-ESM	31.66	1354	2.20E-16	0.6205	0.6817	0.6522
GIS-E2-R-p1	34.78	1354	2.20E-16	0.6578	0.7141	0.6870

Tabla 4.5
Estadístico t Student

Correlación t Student de dos muestras									
Modelo	Coeficientes		Std Error β_0	Std Error β_1	t valor $\text{lor}-\beta_1$	Pr(> t) β_1	Pr(> t) β_2	r^2	
	β_0	β_1							
IPSL-CM5A-MR	24.37	0.7431	5.4923	0.04556	4.437	16.311	9.85E-06	2.00E-16	0.164
MI-ROC-ESM	-26.59	1.1787	4.5373	0.03723	-5.861	31.66	5.77E-09	2.00E-16	0.425
GIS-E2-R-p1	-94.93	1.4721	6.0347	0.04232	-15.73	34.79	2.00E-16	2.00E-16	0.472

Tabla 4.6
Estadístico Fisher

Correlación Fisher			
Modelo	F estadístico	DF	p-valor
IPSL-CM5A-MR	266	1354	2.20E-16
MIROC-ESM	1002	1354	2.20E-16
GIS-E2-R-p1	1210	1354	2.20E-16

Tabla 4.7
Estadístico Kolmogorov - Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)			
Modelo	D	p-valor	hipotesis alternativa
IPSL-CM5A-MR	0.61504	0.7708	two-sided
MIROC-ESM	0.54499	0.9108	two-sided
GIS-E2-R-p1	0.5413	0.9182	two-sided

tienden a una línea recta (Figura 4.9), cumpliendo con otro supuesto de regresión lineal.

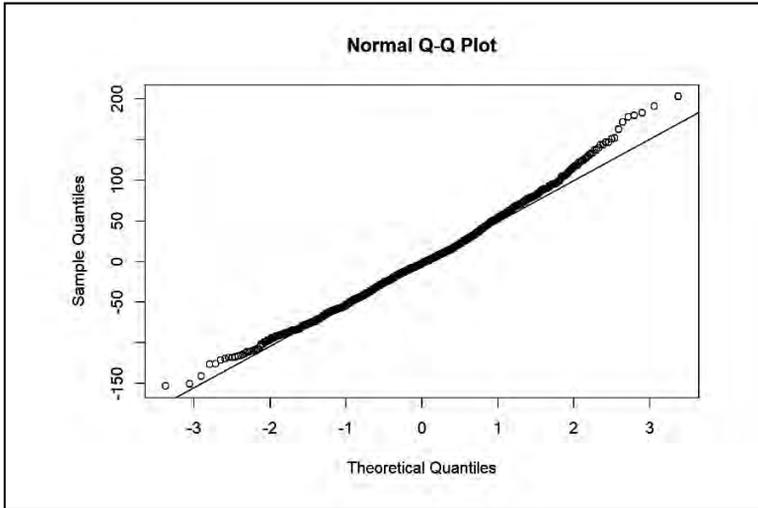


Figura 4.9 Normalidad de residuos de los valores observados y del modelo GIS-E2-R-p1.

Prueba de studentized Breusch Pagan

Decimos que se cumple la homocedasticidad cuando la varianza de los valores residuales es constante (Figura 4.10).

En la Tabla 4.8, se corre el estadístico de Breusch – Pagan, y se confirma la hipótesis alternativa: que las varianzas no son constantes ($2.20E-16 < 0.05$) y el modelo es heterocedástico, no se cumple este supuesto de regresión lineal, puede deberse a que la data observada es

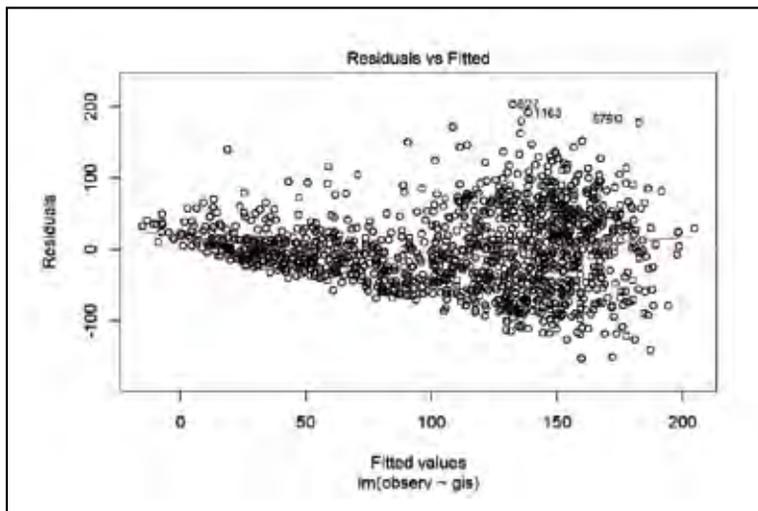


Figura 4.10 Varianza de residuales de los valores observados y el modelo GIS-E2-R-p1

Tabla 4.8
Estadístico Breusch - Pagan

Prueba studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)			
Modelo	BP	df	p-valor
IPSL-CM5A-MR	27.751	1	1.38E-07
MIROC-ESM	203.25	1	2.20E-16
GIS-E2-R-p1	137.28	1	<2.20E-16

heterogénea, o existe presencia de valores atípicos en la muestra seleccionada. El modelo de regresión analizado en este estudio solamente existirá para el sector de la data que se comporta homocedásticamente; mientras que los coeficientes del modelo, no explicarían el fenómeno en el sector heterocedástico (Piol & Soitave, s. f., pp. 9–10).

Prueba de Durbin Watson

En la Tabla 4.9, utilizamos el estadístico de Durbin – Watson y comprobamos un p-valor = 0 cumpliéndose la hipótesis nula, en donde no existe autocorrelación en los modelos estudiados, cumpliendo otro supuesto de regresión lineal.

4.4.4 Incremento de precipitación media

Utilizando el modelo validado de regresión lineal entre la precipitación observada y la precipitación modelada (GIS-E2-R-p1). En la Tabla 4.10, se observa que para la zona de estudio; la precipitación media aumenta de 19.99 a 23.77% para las décadas entre el 2014 y 2100.

4.5 Conclusiones

El modelo de precipitación GIS-E2-R-p1 (1900-2100) es el que mejor se ajusta a la precipitación observada (1901-2013), explica el 47.2% de los datos observados; cumpliendo con los estadísticos que validan la regresión lineal (Precipitación observada = 1.47 Precipitación modelada - 94.93), con excepción de la homocedasticidad.

Tabla 4.9
 Estadístico Durbin - Watson

Durbin-Watson Test for Autocorrelated Errors					
Modelo	lag	Autocorrelation	D-W Statistic	p-value	Alternative hypothesis
IPSL-CM5A-MR	1	0.5583064	0.881684	0	$\rho \neq 0$
MIROC-ESM	1	0.4950209	1.007893	0	$\rho \neq 0$
GIS-E2-R-p1	1	0.4016459	1.194942	0	$\rho \neq 0$

Tabla 4.10
 Estadísticos de precipitación observada y el modelo GIS-E2-R-p1,
 para diferentes décadas

años	Observada	GIS-E2-R-p1				
	1901-2013	2014-2030	2030-2050	2050-2070	2070-2090	2090-2100
Min.	1.83	57.86	54.10	60.35	44.68	54.59
1Q	46.74	104.84	97.80	97.38	96.82	91.30
Median	90.71	142.09	141.50	141.27	140.57	137.38
Mean	108.92	134.80	133.30	132.29	132.84	130.59
3Q	169.19	163.46	165.70	163.30	167.24	163.62
Max.	360.50	197.76	197.50	202.02	205.24	193.41
	% increase mean	23.77	22.39	21.46	21.97	19.90

El modelo de precipitación GIS-E2-R-p1, proyecta un incremento de la precipitación de 20 al 24% para los años 2014 – 2100, bajo el escenario “pesimista” (RCP 8.5) y considerando 20 días de precipitación por mes.

4.6 Bibliografía

Bedia, J., Baño-Medina, J., Legasa, M. N., Iturbide, M., Manzananas, R., Herrera, S., ... Gutiérrez, J. M. (2020). Statistical downscaling with the downscale R package (v3.1.0): Contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1711-1735. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1711-2020>

Brust, A. V. (s. f.). Capítulo 5 Modelado estadístico | Ciencia de Datos para Gente Sociable. Recuperado de https://bitsandbricks.github.io/ciencia_de_datos_gente_sociable/modelado-estad%C3%ADstico.html#ejercicios-3

INAMHI. (2019). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador. Recuperado 24 de abril de 2019, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>

Institut Pierre Simon Laplace. (2011). IPSL - CM5A - MR.

Iturbide, M., Bedia, J., Herrera, S., Baño, J., Manzananas, R., & Gutiérrez, J. M. (s. f.). downscaleR: An -based package for statistical downscaling and bias

correction within the climate4R framework: A worked example. 1.

Meehl, G. A., Washington, W. M., Arblaster, J. M., Hu, A., Teng, H., Kay, J. E., ... Strand, W. G. (2013). Climate Change Projections in CESM1(CAM5) Compared to CCSM4. *Journal of Climate*, 26(17), 6287-6308. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00572.1>

Muenchow, R. L., Jakub Nowosad, Jannes. (s. f.). Geo-computation with R. Recuperado de <https://geocompr.robinlovelace.net/>

NASA. (2017). Giovanni. Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

NOAA. (2017). GPCC Global Precipitation Climatology Centre. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>

Piol, & Soitave. (s. f.). Validación de regresión lineal mediante el análisis de homocedasticidad. *UPAV* 94, 28.

Porras. (2015). Análisis de estudios e investigaciones de tendencias y eventos climáticos extremos en Ecuador. 36.

Porras. (2016). Análisis de tendencias y eventos climáticos extremos para Ecuador. 48.

Porras, Cedeño, & Jácome. (2016). Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. 122.

- Royé, D. D. (2019, julio 7). Visualizar anomalías de precipitación mensual. Recuperado 17 de octubre de 2020, de Dominic Royé website: </es/2019/visualizar-anomal%C3%ADas-de-precipitaci%C3%B3n-mensual/>
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., ... Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive: GISS MODEL-E2 CMIP5 SIMULATIONS. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141-184. <https://doi.org/10.1002/2013MS000265>
- Schmidt, G. A., Ruedy, R., Hansen, J. E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., ... Yao, M.-S. (2006). Present-Day Atmospheric Simulations Using GISS ModelE: Comparison to In Situ, Satellite, and Reanalysis Data. *Journal of Climate*, 19(2), 153-192. <https://doi.org/10.1175/JCLI3612.1>
- Watanabe. (s. f.). MIROC - ESM. Recuperado de doi: [10.5194/gmdd-4-1063-2011](https://doi.org/10.5194/gmdd-4-1063-2011), 2011.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (4th ed). Cambridge: Elsevier.

Capítulo 5

**Downscaling estadístico,
escenario RCP 8.5,
Galápagos – Ecuador**

Downscaling estadístico, escenario RCP 8.5, Galápagos – Ecuador

Statistical downscaling, RCP 8.5 scenario, Galapagos - Ecuador

Sánchez, Eddy.⁹

5.1 Resumen

Este estudio pretende entender inicialmente, cómo influirá en el futuro la temperatura media de aire y precipitación en la biosfera de las Galápagos. La mejor relación lineal ($r = 0.838$) es: entre la temperatura del mar y la temperatura media del aire (1965-2020); explicando el 70.3% de los datos correlacionados, cumpliendo con los supuestos estadísticos que validan el modelo, con una ecuación de regresión lineal ($t_{mar} = 2.78 + 0.85 t_{media_aire}$).

Para validar un modelo estadístico de temperatura media de aire y precipitación, se usaron: datos climatológicos observados de la fundación Charles Darwin

9. Área de Geotecnia - Hidráulica y Sanitaria. Profesor de Suelos, Geología, Hidrología. Fac. de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Apartado 17-01-2184, Quito, Ecuador.

1965-2020, y modelos (RCP 8.5) de temperatura media de aire mensual y precipitación diaria 1965-2100 (IPSL¹⁰, AORI¹¹, NASA¹², SOA¹³, KMA¹⁴). Obteniendo los mejores resultados con el modelo HadGEM2-AO de KMA, para temperatura media de aire mensual, que explica el 18.13% de los datos observados; y validado estadísticamente con pruebas de regresión lineal ($t_{\text{media_aire observada}} = 1.348 t_{\text{media_aire modelada}} - 10.37$); encontrando en el modelo HadGEM2-AO, que la temperatura media del aire aumenta del 2.46 a 6.34 °C, entre los años 2020 y 2100. La precipitación no se pudo validar estadísticamente con pruebas de regresión lineal.

Palabras clave: Downscaling, cambio climático, precipitación, cuenca hidrográfica.

Summary

This study aims to initially understand how the average air temperature and precipitation will influence

-
10. KNMI Climate Explorer and IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France).
 11. KNMI Climate Explorer and JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanagawa, Japan), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba, Japan), and NIES (National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan).
 12. KNMI Climate Explorer and NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies) New York, NY.
 13. FIO – The First Institute of Oceanography, SOA, China.
 14. NIMR/KMA – National Institute of Meteorological Research/ Korea Meteorological Administration.

the Galapagos biosphere in the future. The best linear relationship ($r = 0.838$) is: between sea temperature and mean air temperatura (1965-2020); explaining 70.3% of the correlated data, complying with the statistical assumptions that validate the model, with a linear regression equation ($tmar = 2.78 + 0.85 tmedia_aire$).

To validate a statistical model of mean air temperature and precipitation, the following were used: observed climatological data from the Charles Darwin Foundation 1965-2020, and models (RCP 8.5) of mean monthly air temperature and daily precipitation 1965-2100 (IPSL, AORI, NASA, SOA, KMA). Obtaining the best results with the KMA HadGEM2-AO model, for average monthly air temperature, which explains 18.13% of the observed data; and statistically validated with linear regression tests (observed $tmean_air = 1.348$ modeled $tmean_air - 10.37$); finding in the HadGEM2-AO model, that the mean air temperature increases from 2.46 to 6.34 °C, between the years 2020 and 2100. The precipitation could not be statistically validated with linear regression tests.

Keywords: Downscaling, climate change, precipitation, river basin.

5.2 Introducción

Esta investigación es un intento de entender las variables climáticas observadas de las Galápagos y relacionadas entre sí. Además, combinar los valores mensuales de precipitación observada (1965-2020) y los

valores de precipitación mensual modelada (1965-2100), para encontrar una relación estadística de regresión lineal.

Según (G. Porras et al., 2016), a nivel estacional, para la temporada de lluvias de Galápagos (Diciembre-Enero Febrero), los escenarios muestran incrementos de temperatura del orden de 1°C para el periodo 2011-2040. Hacia mitad de siglo 2041-2070, la temperatura aumentaría entre 1,5 y 2,5°C, presentándose el mayor incremento bajo el RCP 8.5. Para finales de siglo 2071-2100, la temperatura sería 3°C superior al promedio 1981-2005, en el escenario RCP 8.5 (Tabla 5.1).

Tabla 5.1
Escenarios RCP 2.6-8.5 - Temperatura

Años	Temperatura (°C) - Galápagos			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2011-2040	0.74	0.99	0.79	1.00
2041-2070	1.24	1.59	1.53	2.45
2071-2100	1.17	2.37	2.45	4.39

En la Tabla 5.2, se observa la variable precipitación para el periodo 2011-2100, la estación ubicada en San Cristóbal - Galápagos (M0221), presentarían incrementos superiores al 10% bajo el RCP 8.5. Además, se observa que habría eventos de variabilidad climática asociados a

Tabla 5.2
Escenarios RCP 2.6-8.5 - Precipitación

Años	Precipitación (% aumento) - Galápagos			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2011-2040	11.80	13.80	11.60	24.60
2041-2070	16.50	24.20	16.20	28.20
2071-2100	22.90	42.40	35.10	51.00

aumentos de precipitación. Para el periodo 2011-2040, para la parte insular serían entre 12-25%. Para 2041-2070 para Galápagos habría incrementos entre 16 a 28%. Finalmente, para 2071-2100, el aumento es bastante significativo, con valores superiores al 20% bajo todos los escenarios (G. Porras et al., 2016).

5.3 Materiales y métodos

5.3.1 Ubicación del área de estudio

Las islas Galápagos se encuentran en el Océano Pacífico a 972 Km al oeste del Ecuador (Figura 5.1). Tiene una superficie de 8010 Km², con alturas promedio de 0 a 864 msnm. El modelo de predicción climática se tomó en los vértices geográficos (1.52, -86.1; -2.35, -93.75).



Figura 5.1 Galápagos, Fuente: National Geographic World Map

5.3.2 Obtención de datos climáticos observados en las Galápagos

Los datos diarios de: temperatura ambiental, temperatura del mar, humedad y precipitación se obtuvieron de la Fundación Charles Darwin, desde el 31-12-1964 al 31-08-2020 (*Charles Darwin Foundation, 2020*).

5.3.3 Obtención de información de modelos geoestadísticos de temperatura y precipitación

Los valores de área, perímetro, se tomó en los vértices geográficos (1.52, -86.1; -2.35, -93.75) del Océano Pacífico – Ecuador. Se obtuvo las temperaturas (°C) y precipitaciones mensuales (mm/día), para los años 1965-2100 de los modelos climáticos de campo: cmip5 y experimento: rcp85 (Tabla 5.3).

5.3.4 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de regresión lineal, entre los datos observados de: temperatura del aire, temperatura del mar, precipitación y humedad de las Galápagos. Además, se analizó los datos de temperatura y precipitación observada (1965-2020) versus los modelados (1965-2100), utilizando las pruebas mencionadas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.3
Modelos utilizados, años 1965 - 2100

Modelo	Institución	Resolución (° de arco)
IPSL-CM5A-MR	KNMI Climate Explorer and IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France)	2.5x2.5x2
MIROC-ESM	KNMI Climate Explorer and JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanagawa, Japan), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba, Japan), and NIES (National Institute for Environmental Studies, Ibaraki, Japan)	2.8125x2.7906
GIS-E2-R-p1	KNMI Climate Explorer and NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies) New York, NY	2.5x2
FIO-ESM	FIO - The First Institute of Oceanography, SOA, China	2.81x2.77
Had-GEM2-AO	NIMR/KMA - National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	1.88x1.25

Tabla 5.4
Pruebas estadísticas de regresión lineal

Autor	Prueba
Pearson's	Correlación producto-momento
t Student de dos muestras	Correlación
Fisher	Correlación
Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)	Normalidad
Studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)	Homocedasticidad
Durbin-Watson (errores autocorrelacionados)	Independencia de variables

5.4 Resultados y análisis

5.4.1 Análisis de datos climáticos en las Galápagos

En la Figura 5.2, se observa, las variaciones mensuales de temperatura histórica mensual para los años 1965 – 2020, con una temperatura media anual de 24 °C.

En la Figura 5.3, se observan, las variaciones mensuales de humedad histórica mensual para los años 1965 – 2020, con una humedad promedio mensual de 86%.

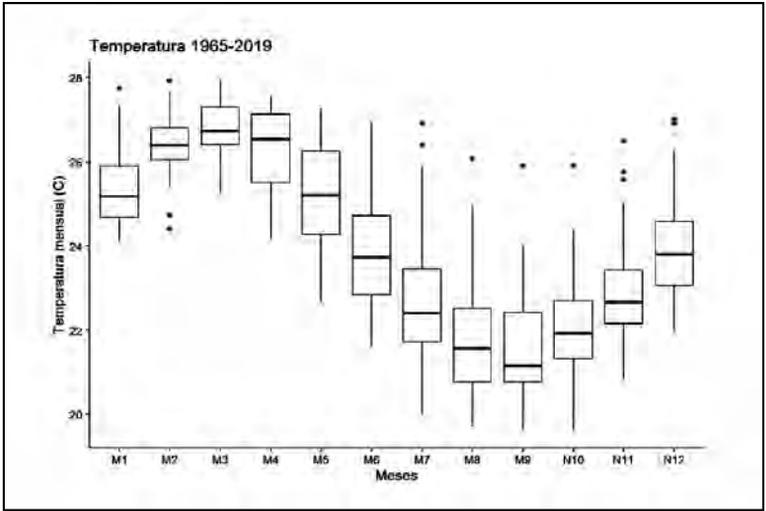


Figura 5.2 Temperatura histórica mensual, Galápagos años 1965-2019. Fuente: (Charles Darwin Foundation, 2020).

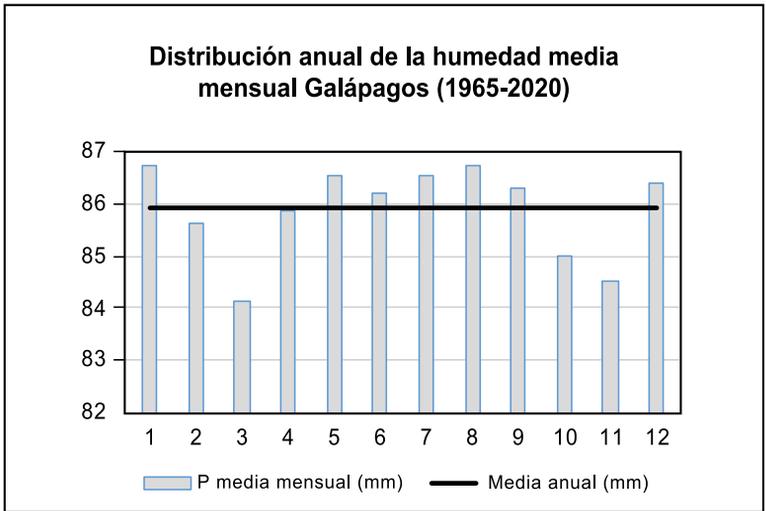


Figura 5.3 Diagrama de caja mensual de humedad histórica de la cuenca inicial río Toachi, años 1965-2020 (Charles Darwin Foundation, 2020).

Las mayores precipitaciones se dan en los meses de enero a mayo y las menores en los meses de junio a diciembre, con una precipitación promedio mensual de 38 mm. (Figura 5.4).

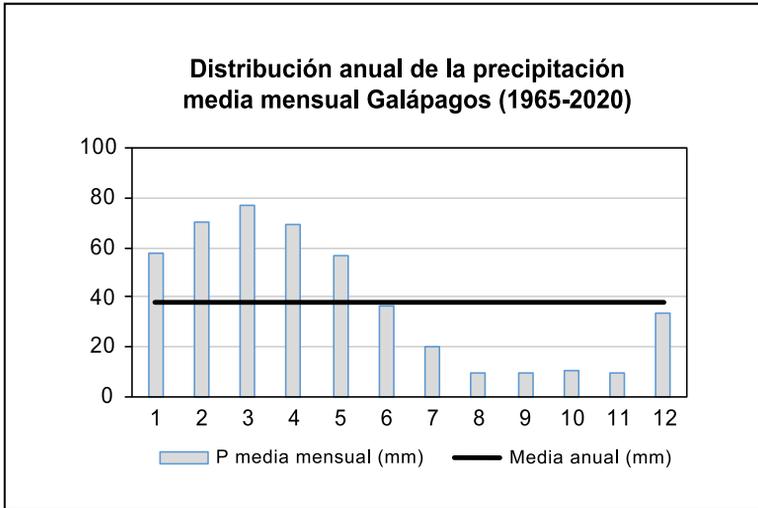


Figura 5.4 Precipitación histórica mensual, Islas Galápagos, años 1965-2020. **Fuente:** (*Charles Darwin Foundation, 2020*).

En la Figura 5.5, podemos observar las anomalías de precipitación.

5.4.2 Análisis estadísticos de datos climáticos de las Galápagos

Utilizando los parámetros de temperatura, humedad y precipitación para los años 1965 – 2100, se observa

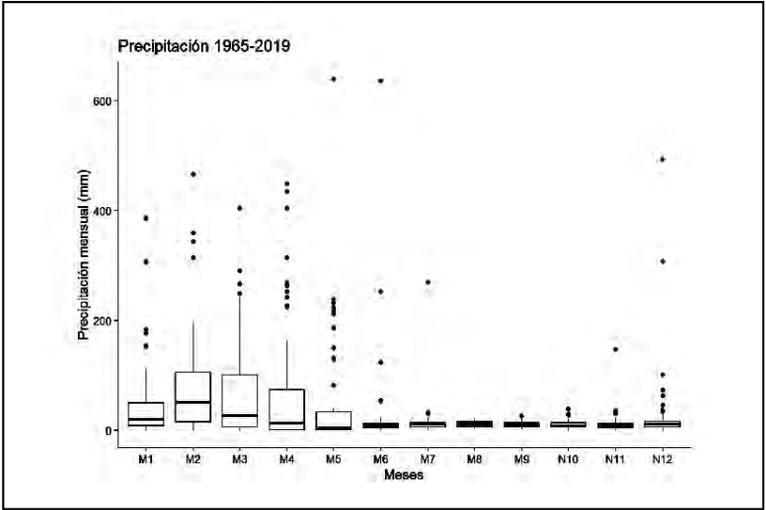


Figura 5.5 Anomalías de precipitación mensual, Islas Galápagos, años 1965-2020. **Fuente:** (Charles Darwin Foundation, 2020).

la mejor correlación lineal $r=0.838$, entre la temperatura del mar y la temperatura media del aire (Tabla 5.5).

Los estadísticos principales de los datos climáticos de las Galápagos se observan en la Tabla 5.6:

El histograma de frecuencias para temperatura del mar y la temperatura media del aire se tienen en la Figura 5.6.

Tabla 5.5
Correlación lineal r

correlación r	
	tmar
tmin_aire	0.793
tmax_aire	0.720
tmedia_aire	0.838
tmar	1.000
humedad	-0.114
precip	0.144
horas_sol	0.282
nubes	-0.322

Tabla 5.6
Estadísticos principales 1965-2020

	tmin aire	tmax aire	tmedia aire	tmar	hume- dad	precip diaria	horas sol	nubes
Min.	14.30	16.30	18.40	16.00	67.00	0.00	0.00	0.00
Q1	20.30	25.20	22.70	22.00	84.00	0.00	0.60	5.00
Median	21.90	27.30	24.40	23.60	88.00	0.00	3.90	6.00
Mean	21.74	27.46	24.40	23.53	87.76	0.95	4.34	6.01
Q3	23.40	29.80	26.30	25.20	92.00	0.30	7.70	7.00
Max.	30.50	36.00	29.50	28.90	100.00	128.70	11.70	8.00

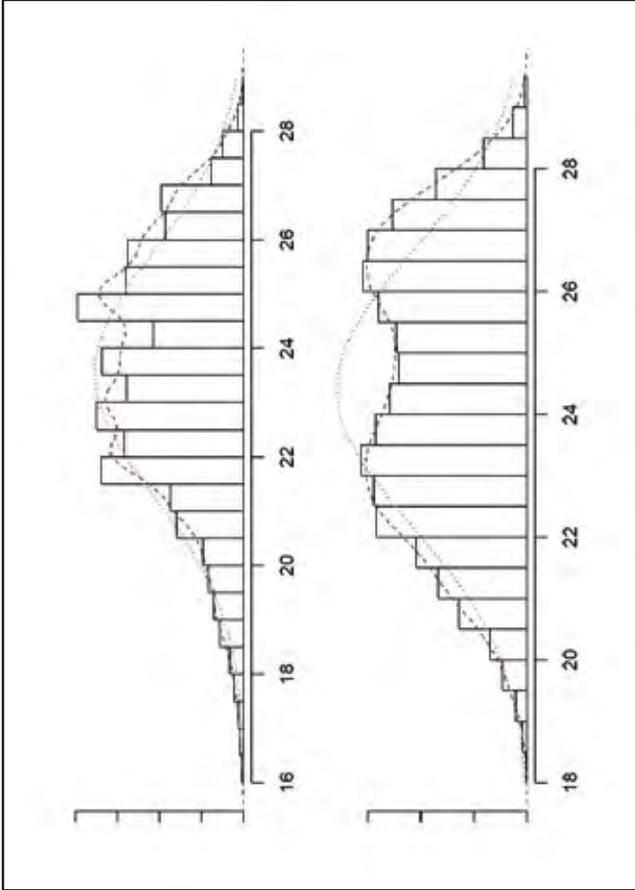


Figura 5.6 Histograma de frecuencia para: temperatura del mar – temperatura media del aire; Galápagos

5.4.3 Relación entre Temperatura del mar y temperatura media ambiental

Los datos de temperatura del mar en función de la temperatura media ambiental para la zona de estudio entre los años 1965 y 2020 se observan en la Figura 5.7.

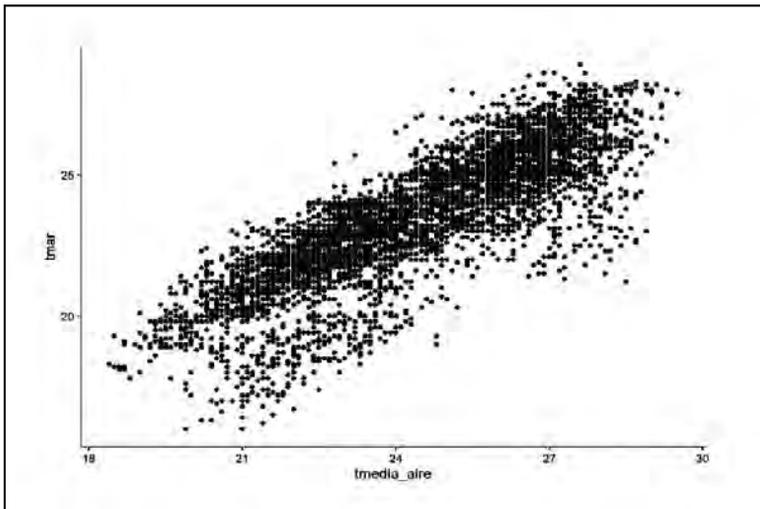


Figura 5.7 Relación entre la temperatura del mar y la temperatura media aire, Galápagos 1965-2020.

Correlación producto-momento Pearson's

En la Tabla 5.7, se observa una correlación mejor ($r = 0.8382$), entre los datos de temperatura del mar y temperatura media del aire.

Tabla 5.7
Estadístico Pearson's

Correlación producto-momento Pearson's						
Modelo	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza		r
				Estimaciones de r		
tmar/ tmedia_aire	116.37	5732	2.20E-16	0.8303	0.8457	0.8382

Correlación t Student de dos muestras

En la Tabla 5.8, vemos que el modelo de regresión lineal tmar vs. tmedia_aire, explica el 70.3% de los datos observados. Los coeficientes β_0 y β_1 cumplen con la hipótesis alternativa ($2.00E-16 < 0,05$) de ser representativos de la ecuación de regresión lineal ($tmar = 2.78 + 0.85 tmedia_aire$).

Correlación de Fisher

En la Tabla 5.9, la correlación de Fisher es mejor para el modelo tmar/tmedia_aire, con un F estadístico de 13540, donde la varianza explicada del modelo de regresión es mayor a la varianza (residual) que no puedo explicar con el modelo y cumple la hipótesis alternativa, con 95% de nivel de confianza y 5% de nivel de significación, existiendo diferencia de varianza explicada y no explicada ($2.20E-16 < 0.05$), cumpliendo con otra condición de

Tabla 5.8
 Estadístico t Student

Correlación t Student de dos muestras									
Modelo	Coeficientes		Std Error β_0	Std Error β_1	t valor $-\beta_1$	t valor $-\beta_2$	Pr(> t) β_1	Pr(> t) β_2	r^2
	β_0	β_1							
tmar/tme- dia_aire	2.78	0.85	0.1789	0.00730	15.55	116.37	2.00E-06	2.00E-16	0.7026

regresión lineal, en donde el modelo es estadísticamente significativo.

Tabla 5.9
Estadístico Fisher

Correlación Fisher			
Modelo	F estadístico	DF	p-valor
tmar/tmedia_aire	13540	5732	2.20E-16

Prueba de Kolmogorov Smirnov

En la Tabla 5.10, se confirma el supuesto de normalidad en los residuos, donde se cumple la hipótesis nula ($0.2901 > 0.05$) para un 5% de nivel de significancia. Gráficamente los cuartiles de los valores residuales tienden a una línea recta (Figura 5.8), cumpliendo con otro supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.10
Estadístico Kolmogorov - Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)			
Modelo	D	p-valor	hipótesis alternativa
tmar/tmedia_aire	0.98186	0.2901	two-sided

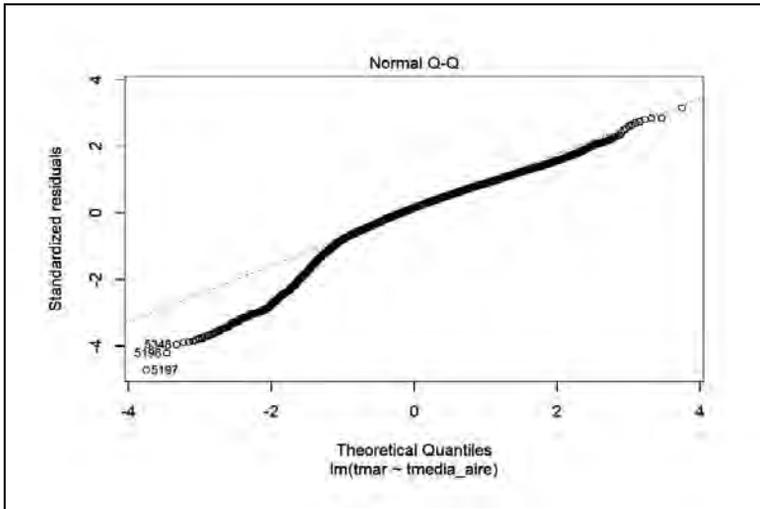


Figura 5.8 Normalidad de residuales de los valores $tmar/tmedia_aire$.

Prueba de studentized Breusch Pagan

Decimos que se cumple la homocedasticidad cuando la varianza de los valores residuales de la variable independiente ($tmar$) es constante (Figura 5.9).

En la Tabla 5.11, se corre el estadístico de Breusch – Pagan, y se confirma la hipótesis nula: ($0.4853 > 0.05$) y el modelo es homocedástico, cumpliendo otro supuesto de regresión lineal.

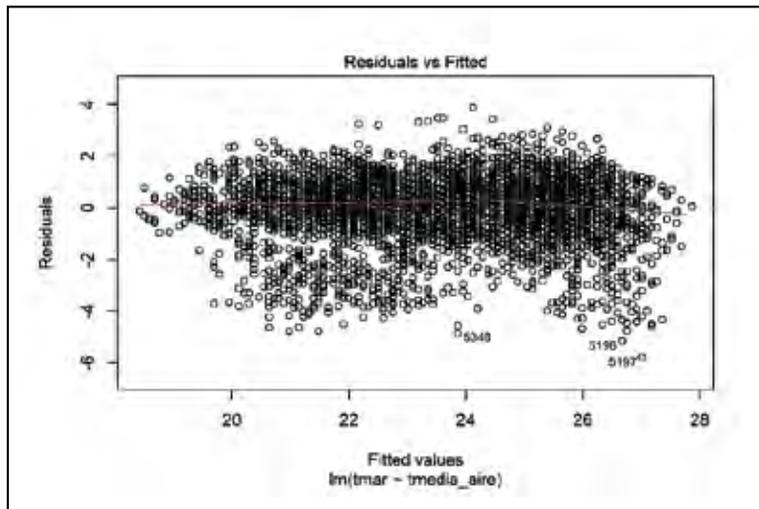


Figura 5.9 Varianza de residuales de los valores tmar/tmedia_aire

Tabla 5.11
Estadístico Breusch - Pagan

Prueba studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)			
Modelo	BP	df	p-valor
tmar/tmedia_aire	0.487	1	0.4853

Prueba de Durbin Watson

En la Tabla 5.12, utilizamos el estadístico de Durbin – Watson y comprobamos un p-valor = 0, cumpliéndose la hipótesis nula, en donde no existe auto-correlación en tmar/tmedia_aire, cumpliendo otro supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.12
Estadístico Durbin - Watson

Durbin-Watson Test for Autocorrelated Errors					
Modelo	lag	Auto-correla-tion	D-W Statistic	p-value	Alternative hypothesis
tmar/ tmedia_ aire	1	0.8414684	0.316831	0	rho != 0

5.4.4 Análisis de temperatura y precipitación mensual en las Galápagos vs. modelos climáticos

En la Tabla 5.13, observamos la correlación producto-momento de Pearson's de la temperatura media de aire mensual de las Galápagos (1965-2020), versus los modelos climáticos de campo: cmip5 y experimento: rcps85, años (1965-2100). La mejor correlación lineal ($r = 0.4272$) es para el modelo climático HadGEM2-AO.

Tabla 5.13
 Estadístico Pearson's – Temperatura media del aire mensual

Correlación producto-momento Pearson's - Temperatura media aire						
Modelo climático	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza		r
				Estimaciones de r		
IPSL-CM5A-MR	10.64	666	2.20E-16	0.3145	0.4442	0.3812
MIROC-ESM	-4.21	666	2.88E-05	-0.2307	-0.0863	-0.1611
GIS-E2-R-p1	-4.15	666	3.77E-05	-0.2318	-0.0838	-0.1587
FIO-ESM	5.49	666	5.67E-08	0.1344	0.2796	0.2081
HadGEM2-AO	12.19	666	2.20E-16	0.3632	0.4873	0.4272

Tabla 5.14
Estadístico Pearson's – Precipitación mensual

Correlación producto-momento Pearson's - Precipitación						
Modelo	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza Estimaciones de r	r	
IPSL-CM5A-MR	-0.35	666	7.29E-01	-0.06249	0.08919	0.0134
MIROC-ESM	3.84	666	1.30E-04	0.07245	0.2208	0.1475
GIS-E2-R-p1	6.19	666	1.06E-09	0.1601	0.3036	0.2332
FIO-ESM	2.61	666	9.32E-03	0.02486	0.17505	0.1005
HadGEM2-AO	-0.42	666	6.76E-01	-0.091	0.05975	-0.0162

En la Tabla 5.14, tenemos la correlación producto-momento de Pearson's de la precipitación mensual de las Galápagos (1965-2020), versus los modelos climáticos de campo: cmip5 y experimento: rcp85, años (1965-2100). La mejor correlación lineal ($r = 0.2332$) es para el modelo climático GIS-E2-R-p1.

5.4.5 Análisis de temperatura media de aire de las Galápagos vs. modelo climático HadGEM2-AO

Utilizando el parámetro de temperatura media de aire mensual para Galápagos (1965-2020) y para el modelo HadGEM2-AO (1965-2100), se obtuvo la Figura 5.10.

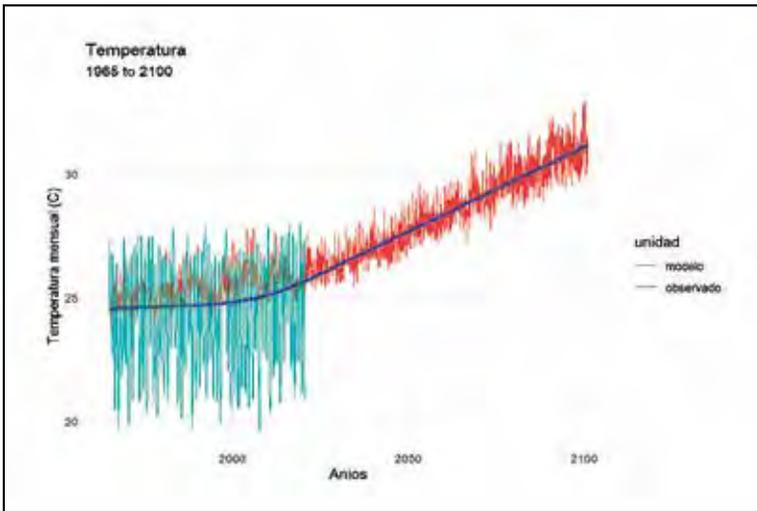


Figura 5.10 tmedia_aire, (1965-2020) vs. modelo HadGEM2-AO (1965-2100). Galápagos.

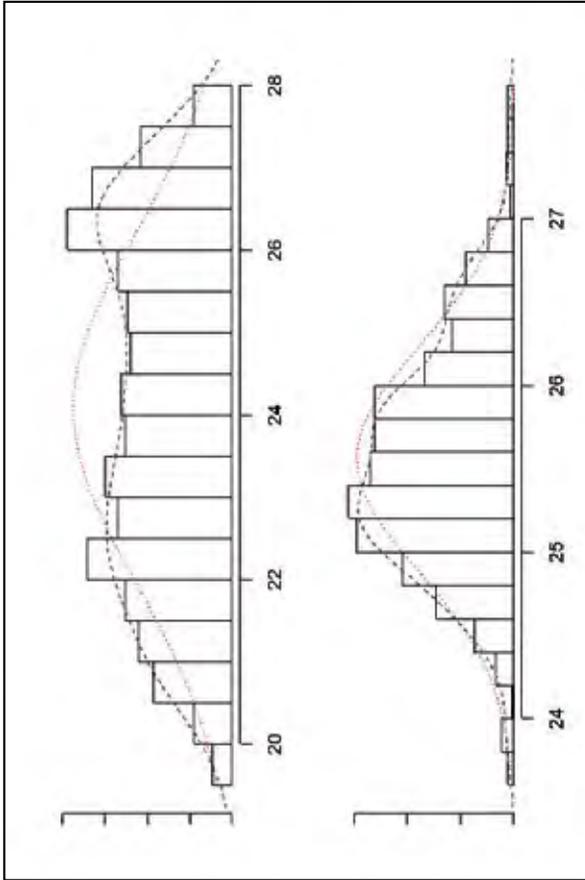


Figura 5.11 Histograma de frecuencia para la *t*_media aire Galápagos – modelo (HadGEM2-AO).

El histograma de frecuencias para la temperatura media de aire en las Galápagos vs. el modelo HadGEM2-AO, se tienen en la Figura 5.11.

Los datos de t_{media} aire observada y modelada para la zona de estudio entre los años 1965 y 2019 se observan en la Figura 5.12.

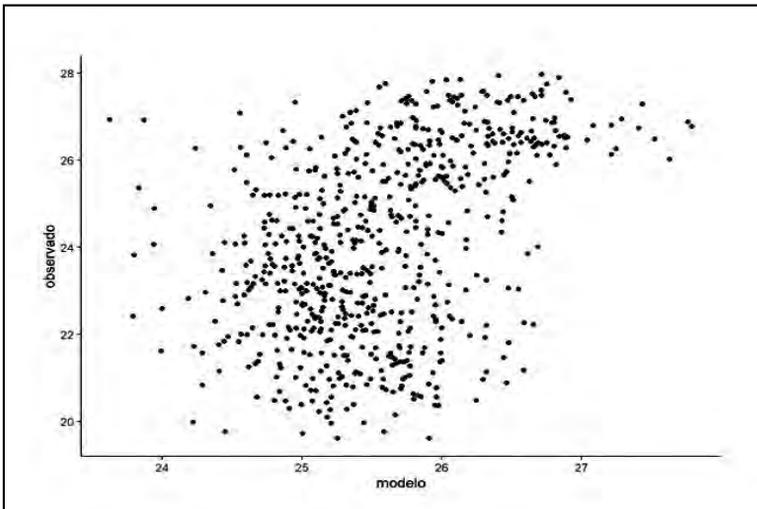


Figura 5.12 Datos de t_{media} aire observada (observado) vs. modelo (HadGEM2-AO) para los años 1965 – 2019; Galápagos.

Correlación producto-momento Pearson's – t_{media} aire

En la Tabla 5.15, se observa la correlación ($r = 0.4272$), entre los datos observados en las Galápagos y el modelo HadGEM2-AO.

Tabla 5.15
Estadístico Pearson's

Correlación producto-momento Pearson's						
Modelo	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza Estimaciones de r	r	
HadGEM2-AO	12.19	666	2.20E-16	0.3631	0.4873	0.4272

Tabla 5.16
Estadístico t Student

Correlación t Student de dos muestras							
Coeficientes							
Modelo	β_0	β_1	Std Error β_0	Std Error β_1	t valor $-\beta_1$	t valor $-\beta_2$	$\Pr(> t)$ β_1 β_2 r^2
Had-GEM2-AO	-10.37	1.3480	2.8257	0.1105	-3.669	12.196	0.000263 2.00E-16 0.1813

Correlación t Student de dos muestras – tmedia aire

En la Tabla 5.16, vemos que el modelo HadGEM2-AO, explica el 18.13% de los datos observados. Los coeficientes β_0 y β_1 cumplen con la hipótesis alternativa ($2.00E-16 < 0,05$) de ser representativos de la ecuación de regresión lineal (tmedia_aire observada = 1.348 tmedia_aire modelada - 10.37).

Correlación de Fisher – tmedia aire

En la Tabla 5.17, la correlación de Fisher para el modelo HadGEM2-AO, con un F estadístico de 148.8, donde la varianza explicada del modelo de regresión es mayor a la varianza (residual) que no puedo explicar con el modelo y cumple la hipótesis alternativa, con 95% de nivel de confianza y 5% de nivel de significación, existiendo diferencia de varianza explicada y no explicada ($2.20E-16 < 0.05$), cumpliendo con otra condición de regresión lineal, en donde el modelo es estadísticamente significativo para el 18.13% de la temperatura media observada en Galápagos.

Tabla 5.17
Estadístico Fisher

Correlación Fisher			
Modelo	F estadístico	DF	p-valor
HadGEM2-AO	148.8	666	2.20E-16

Prueba de Kolmogorov Smirnov – tmedia aire

En la Tabla 5.18, se confirma el supuesto de normalidad en los residuos, donde se cumple la hipótesis nula ($0.3079 > 0.05$) para un 5% de nivel de significancia. Gráficamente los cuartiles de los valores residuales tienden a una línea recta (Figura 5.13), cumpliendo con otro supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.18
Estadístico Kolmogorov - Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)			
Modelo	D	p-valor	hipotesis alternativa
HadGEM2-AO	0.8473	0.3079	two-sided

Prueba de studentized Breusch Pagan – tmedia aire

Decimos que se cumple la homocedasticidad cuando la varianza de los valores residuales es constante (Figura 5.14).

En la Tabla 5.19, se corre el estadístico de Breusch – Pagan, se confirma la hipótesis nula: ($0.5151 > 0.05$) y el modelo es homocedástico,

Tabla 5.19
Estadístico Breusch - Pagan

Prueba studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)			
Modelo	BP	df	p-valor
HadGEM2-AO	0.4231	1	0.5151

Prueba de Durbin Watson – tmedia aire

En la Tabla 5.20, utilizamos el estadístico de Durbin – Watson y comprobamos un p-valor = 0 cumpliéndose la hipótesis nula, en donde no existe autocorrelación en los datos estudiados, cumpliendo otro supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.20
Estadístico Durbin - Watson

Durbin-Watson Test for Autocorrelated Errors					
Modelo	lag	Autoco- rrelation	D-W Statistic	p- value	Alternative hypothesis
Had- GEM2-AO	1	0.846984	0.3014596	0	rho != 0

Tabla 5.21
 Estadísticos de temperatura media de aire observada y el modelo HadGEM2-AO,
 para diferentes décadas.

años	Observada	HadGEM2-AO			
	1965-2020	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
Min.	19.61	24.93	26.19	27.22	28.57
1Q	22.3	26.08	27.13	28.54	29.75
Median	24.08	26.48	27.66	29.08	30.4
Mean	24.08	26.54	27.67	29.12	30.42
3Q	26.06	26.88	28.14	29.63	31.09
Max.	27.96	28.59	29.61	31.34	32.92
	increase mean	2.46	3.59	5.04	6.34

5.4.6 Incremento de temperatura media de aire

Utilizando el modelo validado de regresión lineal entre la temperatura media del aire observada en las Galápagos y la precipitación modelada (HadGEM2-AO). En la Tabla 5.21, se observa que para la zona de estudio; la temperatura media del aire aumenta de 2.46 a 6.34 grados centígrados, para las décadas entre el 2020 y 2100.

Análisis de precipitación de las Galápagos vs. modelo climático GIS-E2-R-p1

Utilizando el parámetro de precipitación mensual para Galápagos (1965-2020) y para el modelo GIS-E2-R-p1 (1965-2100), y considerando meses de 10 días se obtuvo la Figura 5.15.

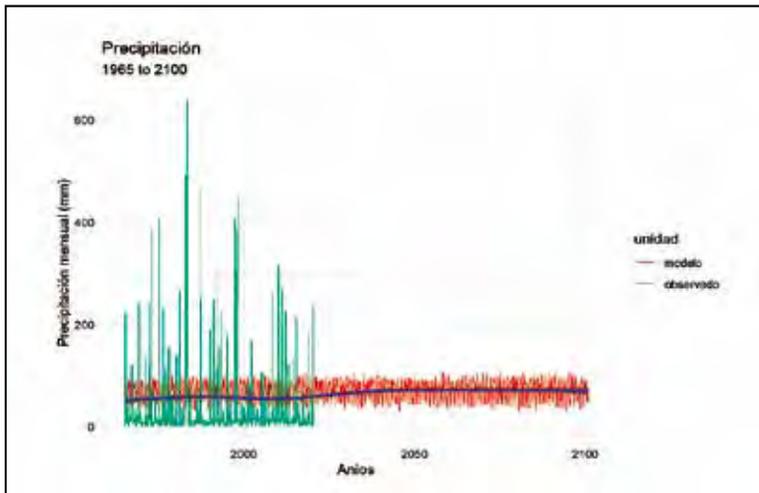


Figura 5.15 Precipitación observada Galápagos (1965-2020) vs. modelo GIS-E2-R-p1 (1965-2100).

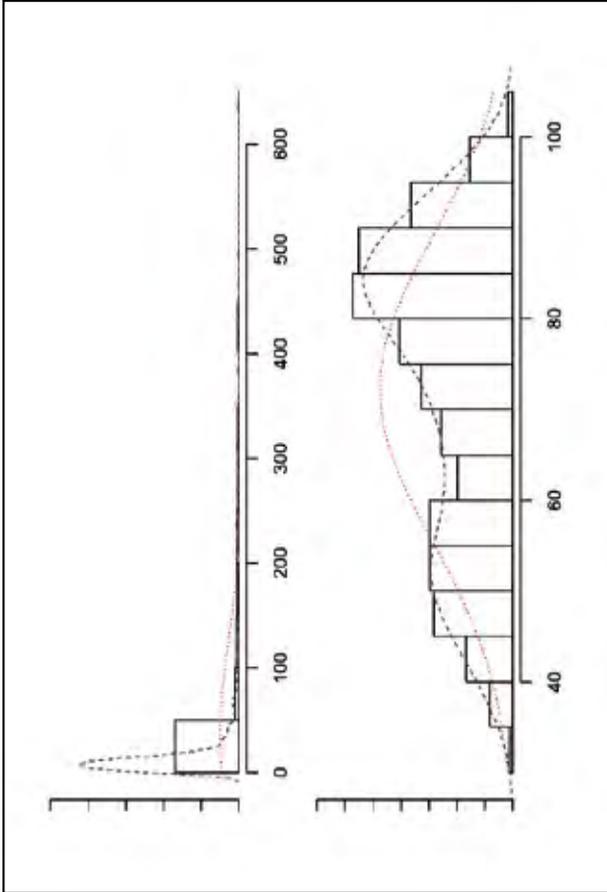


Figura 5.16 Histograma de frecuencia mensual para la precipitación observada de las Galápagos – modelo (GIS-E2-R-p1).

El histograma de frecuencias para la temperatura media de aire en las Galápagos vs. el modelo GIS-E2-R-p1, se tienen en la Figura 5.16.

Los datos de precipitación observada y modelada para la zona de estudio entre los años 1965 y 2019 se observan en la Figura 5.17.

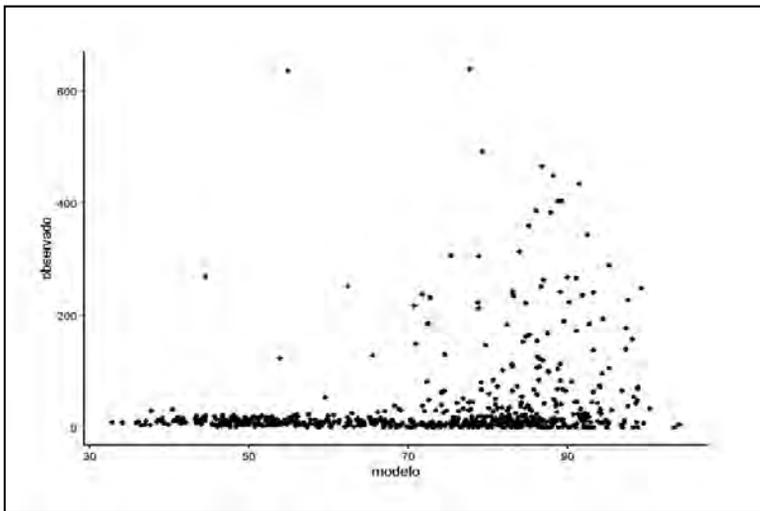


Figura 5.17 Datos de precipitación observada (observado) vs. modelo (GIS-E2-R-p1) para los años 1965 – 2019; Galápagos.

Correlación producto-momento Pearson's – tmedia aire

En la Tabla 5.22, se observa una correlación mejor ($r = 0.2332$), entre los datos observados y el modelo GIS-E2-R-p1.

Tabla 5.22
Estadístico Pearson's

Correlación producto-momento Pearson's						
Modelo	t	df	p-valor	95% Intervalo de confianza		r
				Estimaciones de r		
GIS-E2-R-p1	6.18	666	1.06E-09	0.1601	0.3036	0.2332

Correlación t Student de dos muestras – tmedia aire

En la Tabla 5.23, vemos que el modelo GIS-E2-R-p1, explica el 5.29% de los datos observados. Los coeficientes β_0 y β_1 cumplen con la hipótesis alternativa ($1.06E-09 < 0,05$) de ser representativos de la ecuación de regresión lineal (Precipitación observada = 1.11 Precipitación modelada - 42.41).

Correlación de Fisher – tmedia aire

En la Tabla 5.24, se observa la correlación de Fisher para el modelo GIS-E2-R-p1, con un F estadístico de 38.29, donde la varianza explicada del modelo de regresión es mayor a la varianza (residual) que no puedo explicar con el modelo y cumple la hipótesis alternativa, con 95% de nivel de confianza y 5% de nivel de significación,

Tabla 5.23
 Estadístico t Student

Correlación t Student de dos muestras									
Coeficientes									
Modelo	β_0	β_1	Std Error β_0	Std Error β_1	t valor $-\beta_2$	Pr(> t) β_1	Pr(> t) β_2	r^2	
GIS-E2-R-p1	-42.41	1.1053	13.2346	0.1786	-3.205	6.188	0.00142	1.06E-09	0.0529

existiendo diferencia de varianza explicada y no explicada ($1.06E-09 < 0.05$), cumpliendo con otra condición de regresión lineal, en donde el modelo es estadísticamente significativo para el 5.29% de los datos de precipitación mensual observados en Galápagos.

Tabla 5.24
Estadístico Fisher

Correlación Fisher			
Modelo	F estadístico	DF	p-valor
GIS-E2-R-p1	38.29	666	1.06E-09

Prueba de Kolmogorov Smirnov – tmedia aire

En la Tabla 5.25, se confirma el supuesto de normalidad en los residuos, donde se cumple la hipótesis nula ($0.5082 > 0.05$) para un 5% de nivel de significancia. Gráficamente parte de los cuartiles de los valores residuales tienden a una línea recta (Figura 5.18), cumpliendo parcialmente con otro supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.25
 Estadístico Kolmogorov - Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras (datos: residuos)			
Modelo	D	p-valor	hipótesis alternativa
GIS-E2-R-p1	0.7470	0.5082	two-sided

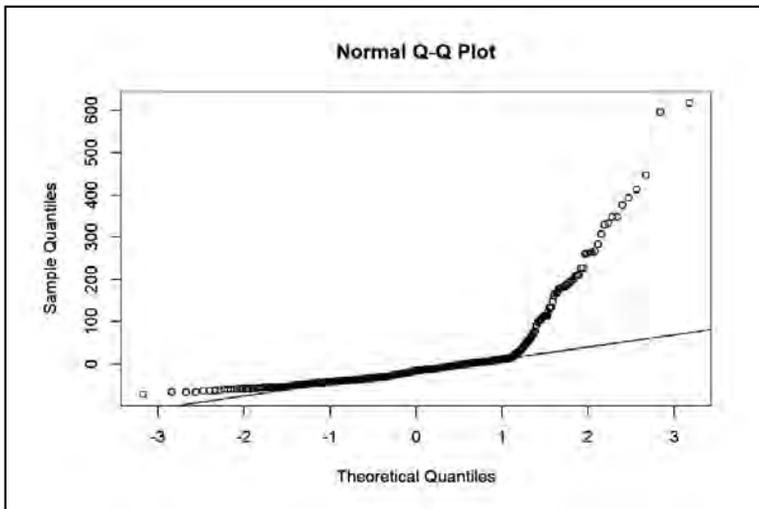


Figura 5.18 Normalidad de residuos de los valores observados y del modelo GIS-E2-R-p1.

Prueba de studentized Breusch Pagan – tmedia aire

Decimos que se cumple la homocedasticidad cuando la varianza de los valores residuales es constante, esto no se observa en la Figura 5.19.

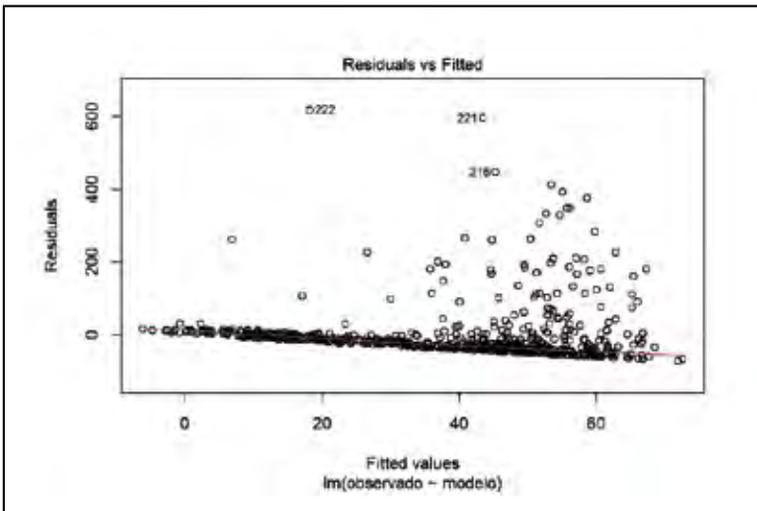


Figura 5.19 Varianza de residuales de los valores observados y el modelo GIS-E2-R-p1

En la Tabla 5.26, se corre el estadístico de Breusch – Pagan, y se confirma la hipótesis alternativa: ($0.0037 < 0.05$) y el modelo es heterocedástico, No cumple con el supuesto de homocedasticidad.

Tabla 5.26
Estadístico Breusch - Pagan

Prueba studentized Breusch-Pagan (datos: regresión)			
Modelo	BP	df	p-valor
GIS-E2-R-p1	8.4275	1	0.0037

Prueba de Durbin Watson – tmedia aire

En la Tabla 5.27, utilizamos el estadístico de Durbin – Watson y comprobamos un p-valor = 0 cumpliéndose la hipótesis nula, en donde no existe auto-correlación en los datos estudiados, cumpliendo un supuesto de regresión lineal.

Tabla 5.27
Estadístico Durbin - Watson

Durbin-Watson Test for Autocorrelated Errors					
Modelo	lag	Autoco- rrelation	D-W Statistic	p- value	Alternative hypothesis
GIS-E2-R-p1	1	0.536929	0.3014596	0	rho != 0

Tabla 5.28
 Estadísticos de precipitación observada y el modelo GIS-E2_R-p1,
 para diferentes décadas

Observada		GIS-E2-R-p1			
años	1901-2013	2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
Min.	0	34.77	31.67	29.28	29.28
1Q	5.41	55.89	53.26	54.94	53.23
Median	10.95	75.78	74.78	75.19	73.4
Mean	37.37	71.68	70.72	71.54	70.77
3Q	22.67	86.55	86.66	87.6	86.54
Max.	638.9	103.69	106.64	105.87	104.82
% increase mean		91.8116136	89.2427081	91.4369815	89.37650522

Incremento de precipitación media

Utilizando el modelo no validado de regresión lineal, entre la precipitación observada y la precipitación modelada (GIS-E2-R-p1). En la Tabla 5.28, se observa que para la zona de estudio; la precipitación media aumenta en un 90% para las décadas entre el 2020 y 2100.

5.5 Conclusiones

Observando los datos climáticos de las Galápagos (1965-2020). La mejor relación lineal ($r = 0.838$) es: entre la temperatura del mar y la temperatura media del aire; explicando el 70.3% de los datos correlacionados, cumpliendo con los supuestos estadísticos que validan el modelo, con una ecuación de regresión lineal ($t_{mar} = 2.78 + 0.85 t_{media_aire}$)

De los modelos estudiados para la temperatura media del aire: HadGEM2-AO (1965-2100) es el que mejor se ajusta a la temperatura media observada en las Galápagos (1965-2020), explica el 18.13% de los datos observados; cumpliendo con los supuestos estadísticos que validan la regresión lineal ($t_{media_aire\ observada} = 1.348 t_{media_aire\ modelada} - 10.37$). El modelo de temperatura media del aire HadGEM2-AO, proyecta un incremento de la temperatura de 2.46 a 6.34 grados centígrados para los años 2020 – 2100, de campo: cmip5, bajo el escenario “pesimista” (RCP 8.5).

El modelo de precipitación mensual (1965-2100), que mejor se ajusta a la precipitación observada en las Galápagos (1965-2020) es: GIS-E2-R-p1. Este modelo de regresión lineal explica el 5.29% de los datos observados y no cumple con los supuestos de: normalidad en los residuos y de homocedasticidad; por tanto, no se puede concluir un aumento de precipitación promedio de 90% para los años 2020-2100.

5.6 Bibliografía

Bedia, J., Baño-Medina, J., Legasa, M. N., Iturbide, M., Manzanos, R., Herrera, S., ... Gutiérrez, J. M. (2020). Statistical downscaling with the downscale R package (v3.1.0): Contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geoscientific Model Development*, 13(3), 1711-1735. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1711-2020>

Brust, A. V. (s. f.). Capítulo 5 Modelado estadístico | Ciencia de Datos para Gente Sociable. Recuperado de https://bitsandbricks.github.io/ciencia_de_datos_gente_sociable/modelado-estad%C3%ADstico.html#ejercicios-3

Charles Darwin Foundation. (2020). Charles Darwin Foundation. <https://www.darwinfoundation.org/en/>

INAMHI. (2019). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador. Recuperado 24 de abril de

2019, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>

Institut Pierre Simon Laplace. (2011). IPSL - CM5A - MR.

Iturbide, M., Bedia, J., Herrera, S., Baño, J., Manzanas, R., & Gutiérrez, J. M. (s. f.). downscaleR: An R-based package for statistical downscaling and bias correction within the climate4R framework: A worked example. 1.

Meehl, G. A., Washington, W. M., Arblaster, J. M., Hu, A., Teng, H., Kay, J. E., ... Strand, W. G. (2013). Climate Change Projections in CESM1(CAM5) Compared to CCSM4. *Journal of Climate*, 26(17), 6287-6308. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00572.1>

Muenchow, R. L., Jakub Nowosad, Jannes. (s. f.). Geocomputation with R. Recuperado de <https://geocompr.robinlovelace.net/>

NASA. (2017). Giovanni. Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

NOAA. (2017). GPCC Global Precipitation Climatology Centre. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>

Piol, & Soitave. (s. f.). Validación de regresión lineal mediante el análisis de homocedasticidad. UPAV 94, 28.

- Porras. (2015). Análisis de estudios e investigaciones de tendencias y eventos climáticos extremos en Ecuador. 36.
- Porras. (2016). Análisis de tendencias y eventos climáticos extremos para Ecuador. 48.
- Porras, Cedeño, & Jácome. (2016). Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. 122.
- Royé, D. D. (2019, julio 7). Visualizar anomalías de precipitación mensual. Recuperado 17 de octubre de 2020, de Dominic Royé website: /es/2019/visualizar-anomal%C3%ADas-de-precipitaci%C3%B3n-mensual/
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., ... Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive: GISS MODEL-E2 CMIP5 SIMULATIONS. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141-184. <https://doi.org/10.1002/2013MS000265>
- Schmidt, G. A., Ruedy, R., Hansen, J. E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., ... Yao, M.-S. (2006). Present-Day Atmospheric Simulations Using GISS ModelE: Comparison to In Situ, Satellite, and Reanalysis Data. *Journal of Climate*, 19(2), 153-192. <https://doi.org/10.1175/JCLI3612.1>

Watanabe. (s. f.). MIROC - ESM. Recuperado de doi:
10.5194/gmdd-4-1063-2011, 2011.

Wilks, D. S. (2019). Statistical methods in the atmospheric sciences (4th ed). Cambridge: Elsevier.

Glosario

Álgebra de mapas

Conjunto de técnicas y procedimientos que, operando sobre una o varias capas en formato ráster, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de nuevas capas de datos.

Anomalías

Desviación del valor promedio de una variable climática.

Correlación

Es una medida estadística que expresa hasta qué punto dos variables están relacionadas.

Cuartil estadístico

Son medidas estadísticas de posición que tienen la propiedad de dividir la serie estadística en cuatro grupos de números iguales de términos.

Degradación

Perdida de la capa superficial del suelo por sobreexplotación y deforestación.

Downscaling estadístico

Modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos de circulación global (GCMs), con las variables locales observadas en superficie (predictandos; típicamente temperatura y precipitación).

Escenario climático

Representación simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas, con posibles consecuencias del cambio climático antropógeno.

Escorrentía

Escurrimiento de agua de lluvia por la red de drenaje.

Espectro electromagnético

Es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones emitidas por el Sol.

Homocedasticidad

Cuando la varianza de los valores residuales es constante.

Infiltración

Es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación.

Inundación

Ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de esta, por desbordamiento de ríos y lluvias torrenciales, entre otros.

Litología

Es la parte de la geología que estudia las características de los suelos y rocas que aparecen constituyendo una determinada formación geológica.

Modelos Climáticos

Los Modelos Climáticos Globales (Global Climate Models, GCM) hacen uso de ecuaciones matemáticas para describir el comportamiento de los factores que impactan el clima.

NDVI

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada obtenida por sensores remotos y fotos multiespectrales.

Parámetros morfométricos

Características de la cuenca en términos de pendiente, topografía, condición del suelo, características de escorrentía, potencial de agua superficial, etc.

Peligro

Nivel de amenaza a la vida, la salud, la propiedad o el medio ambiente.

Percolación:

Paso lento de agua a través de espacios porosos subterráneos, luego de la infiltración.

Regresión lineal:

Se utiliza para predecir el valor de una variable según el valor de otra con una función lineal.

Restauración hidrológica

Conservación ambiental de suelo, agua y manejo de cuencas.

Sensores remotos:

Sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia (satélites, aviones, drones).

Significancia estadística:

Es la probabilidad de que una relación entre dos o más variables en un análisis no sea pura coincidencia, sino que en realidad sea causada por otro factor. La significancia estadística es una forma de demostrar matemáticamente que puedes confiar en una estadística determinada.

Textura de suelo:

Es la proporción en que se encuentran los tres tipos de partículas del suelo (arena, limo y arcilla).

Varianza

Es una medida de dispersión que se utiliza para representar la variabilidad de un conjunto de datos respecto de la media aritmética de los mismo.

Vulnerabilidad

Condición que define la predisposición intrínseca de un sistema a ser afectado por un fenómeno natural o antrópico.

Zonas vulnerables

Zonas geográficas que se encuentran expuestas a eventos naturales o antrópicos.

Índice de contenidos

Capítulo 1

EXPOSICIÓN DE LA CIUDAD DE ATACAMES ANTE EL PELIGRO DE PRECIPITACIONES

EXTREMAS POR FENÓMENO “EL NIÑO”	15
1.1 RESUMEN	15
1.2 INTRODUCCIÓN.....	18
1.3 MATERIALES Y MÉTODOS	19
1.4 RESULTADOS.....	22
1.4.1 Análisis estadístico de datos hidrológicos del río Atacames y sus aportantes	22
1.4.2 Determinar la escorrentía superficial del río Atacames con precipitaciones históricas extremas	24
1.4.3 Zonas vulnerables de la ciudad de Atacames por crecidas del río Atacames.....	26
1.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	27
1.6 BIBLIOGRAFÍA.....	29

Capítulo 2

EVALUACIÓN MULTICRITERIO

DE LA VULNERABILIDAD BIOFÍSICA ANTE

INUNDACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO

ATACAMES - ESMERALDAS - ECUADOR..... 33

2.1	RESUMEN	33
2.2	INTRODUCCIÓN.....	35
2.3	MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.3.1	Selección de criterios y factores de influencia de la inundación en el área de estudio:.....	40
2.3.2	Pendiente y su influencia en la inundación:.....	42
2.3.3	Asignación de pesos a los factores que influyen a la inundación	45
2.4	RESULTADOS.....	46
2.4.1	Comparación por factores utilizando la técnica AHP.....	46
2.4.2	Generación de mapa de inundación con lógica Fuzzy.....	51
2.4.3	Discusión y resultados finales (compilación)	51
2.5	CONCLUSIONES.....	53
2.6	BIBLIOGRAFÍA.....	54

Capítulo 3

**PRIORIZAR ÁREAS DE RESTAURACIÓN
HIDROLÓGICA USANDO ANÁLISIS**

MORFOMÉTRICO, PRECIPITACIÓN Y NDVI;

PARA LA CUENCA INICIAL DEL RÍO TOACHI 59

3.1	RESUMEN	59
3.2	INTRODUCCIÓN.....	61
3.3	MATERIALES Y MÉTODOS	63
3.3.1	Ubicación del área de estudio	63
3.3.2	Obtención de información morfométrica	63
3.3.3	Obtención de precipitaciones históricas.....	66
3.3.4	Obtención del NDVI.....	67
3.3.5	Priorización de subcuencas de intervención ...	69
3.4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	70
3.4.1	Análisis morfométrico	70
3.4.2	Forma de la cuenca (Bs).....	77
3.4.3	Análisis de precipitación y caudales de la cuenca	79
3.4.4	Áreas de intervención (subcuencas) basada en análisis morfométrico.....	81
3.4.5	Priorización de las subcuencas basada en el cambio de superficie ocupada por valores NDVI	85
3.4.6	Priorización de áreas de intervención (subcuencas), considerando morfometría y NDVI	89
3.5	CONCLUSIONES.....	92
3.6	BIBLIOGRAFÍA.....	93

Capítulo 4

DOWNSCALING ESTADÍSTICO, ESCENARIO RCP 8.5, CUENCA INICIAL DEL RÍO TOACHI – COTOPAXI..... 99

4.1	RESUMEN	99
4.2	INTRODUCCIÓN.....	101
4.3	MATERIALES Y MÉTODOS	104
4.3.1	Ubicación del área de estudio:	104
4.3.2	Obtención de precipitaciones observadas	104
4.3.3	Obtención de información de modelos geoestadísticos de precipitación	106
4.3.4	Análisis estadístico	106
4.4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	108
4.4.1	Análisis de precipitación observada	108
4.4.2	Análisis de modelo de precipitación	110
4.4.3	Análisis estadístico de la relación de precipitación histórica y la precipitación modelada.....	111
4.4.4	Incremento de precipitación media	121
4.5	CONCLUSIONES	121
4.6	BIBLIOGRAFÍA.....	124

Capítulo 5

DOWNSCALING ESTADÍSTICO, ESCENARIO

RCP 8.5, GALÁPAGOS – ECUADOR 129

5.1 RESUMEN 129

5.2 INTRODUCCIÓN..... 131

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS 133

 5.3.1 Ubicación del área de estudio: 133

 5.3.2 Obtención de datos climáticos observados
 en Galápagos 135

 5.3.3 Obtención de información de modelos
 geoestadísticos de temperatura y
 precipitación..... 135

 5.3.4 Análisis estadístico 135

5.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS 137

 5.4.1 Análisis de datos climáticos en Galápagos 137

 5.4.2 Análisis estadísticos de datos climáticos
 de Galápagos..... 139

 5.4.3 Relación entre Temperatura del mar y
 temperatura media ambiental 143

 5.4.4 Análisis de temperatura y precipitación
 mensual en Galápagos vs. modelos
 climáticos..... 149

 5.4.5 Análisis de temperatura media de aire
 de las Galápagos vs. modelo climático
 HadGEM2-AO..... 152

 5.4.6 Incremento de temperatura media de aire..... 161

5.5 CONCLUSIONES 171

5.6 BIBLIOGRAFÍA..... 172

GLOSARIO 177

Tablas

Tabla 1.1	Significancia del test de Mann – Kendall.....	20
Tabla 1.2	Indicadores, parámetros y variables de los componentes: peligro y exposición.....	21
Tabla 1.3	Resultados del test de Mann Kendall por décadas desde 1901 hasta 2010.....	25
Tabla 1.4	Resultados de caudales del río Atacames para precipitaciones acumuladas de 48 horas.....	26
Tabla 2.1	Precipitación histórica del mes de febrero, cuenca río Atacames, 1970 – 2000.....	41
Tabla 2.2	Clasificación de pendientes, cuenca río Atacames	42
Tabla 2.3	Textura según la Secretaría de Gestión de Riesgos de Ecuador	43
Tabla 2.4	Uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca del río Atacames.....	44

Tabla 2.5	Profundidad de nivel freático.....	45
Tabla 2.6	Interpretación de escala Saaty.....	47
Tabla 2.7	Matriz de comparación por factores pares de cinco criterios con el proceso AHP.....	49
Tabla 2.8	Determinación de los pesos relativos de criterio	49
Tabla 2.9	Índice de consistencia CI y rango de consistencia CR.....	50
Tabla 2.10	Índices de inconsistencia aleatorios.....	50
Tabla 2.11	Área y porcentaje de inundación en la cuenca hidrográfica del río Atacames	53
Tabla 3.1	Fórmulas utilizadas para obtener los parámetros morfométricos de las subcuencas.....	65
Tabla 3.2	Clasificación de vegetación - valores NDVI.....	68
Tabla 3.3	Clasificación y grado de intervención por subcuenca según: sólo morfometría, sólo NDVI y morfometría y NDVI juntos.....	70
Tabla 3.4	Parámetros dimensionales de las subcuencas analizadas	73

Tabla 3.5	Parámetros morfométricos de las subcuencas analizadas	78
Tabla 3.6	Caudal de cada subcuenca.....	83
Tabla 3.7	Grados de prioridad de intervención por subcuenca.....	84
Tabla 3.8	Área de las subcuencas en función de la clasificación NDVI para el 12-10-1996.....	86
Tabla 3.9	Área de las subcuencas en función de la clasificación NDVI para el 20-9-2017	87
Tabla 3.10	Diferencia del cambio de superficie en las subcuencas con el cambio de NDVI y grados de priorización entre los años 1996 y 2017	88
Tabla 3.11	Priorización de los componentes: morfometría y NDVI	90
Tabla 4.1	Modelos utilizados, años 1900 - 2100.....	107
Tabla 4.2	Pruebas estadísticas de regresión lineal	108
Tabla 4.3	Estadísticos de precipitación.....	112
Tabla 4.4	Estadístico Pearson's	116
Tabla 4.5	Estadístico t Student	117

Tabla 4.6	Estadístico Fisher.....	118
Tabla 4.7	Estadístico Kolmogorov - Smirnov.....	118
Tabla 4.8	Estadístico Breusch - Pagan.....	120
Tabla 4.9	Estadístico Durbin - Watson	122
Tabla 4.10	Estadísticos de precipitación observada y el modelo GIS-E2_R-p1, para diferentes décadas	123
Tabla 5.1	Escenarios RCP 2.6-8.5 - Temperatura.....	132
Tabla 5.2	Escenarios RCP 2.6-8.5 - Precipitación	133
Tabla 5.3	Modelos utilizados, años 1965 - 2100.....	136
Tabla 5.4	Pruebas estadísticas de regresión lineal.....	137
Tabla 5.5	Correlación lineal r	141
Tabla 5.6	Estadísticos principales 1965-2020.....	141
Tabla 5.7	Estadístico Pearson's.....	144
Tabla 5.8	Estadístico t Student	145
Tabla 5.9	Estadístico Fisher.....	146
Tabla 5.10	Estadístico Kolmogorov - Smirnov.....	146
Tabla 5.11	Estadístico Breusch - Pagan.....	148
Tabla 5.12	Estadístico Durbin - Watson	149

Tabla 5.13 Estadístico Pearson's – Temperatura media del aire mensual.....	150
Tabla 5.14 Estadístico Pearson's – Precipitación mensual.....	151
Tabla 5.15 Estadístico Pearson's.....	155
Tabla 5.16 Estadístico t Student	155
Tabla 5.17 Estadístico Fisher.....	156
Tabla 5.18 Estadístico Kolmogorov - Smirnov.....	157
Tabla 5.19 Estadístico Breusch - Pagan.....	159
Tabla 5.20 Estadístico Durbin - Watson	159
Tabla 5.21 Estadísticos de temperatura media de aire observada y el modelo HadGEM2-AO, para diferentes décadas	160
Tabla 5.22 Estadístico Pearson's.....	164
Tabla 5.23 Estadístico t Student	165
Tabla 5.24 Estadístico Fisher.....	166
Tabla 5.25 Estadístico Kolmogorov - Smirnov.....	167
Tabla 5.26 Estadístico Breusch - Pagan.....	169
Tabla 5.27 Estadístico Durbin - Watson	169
Tabla 5.28 Estadísticos de precipitación observada y el modelo GIS-E2_R-p1, para diferentes décadas	170

Figuras

Figura 1.1	Distribución de la precipitación media mensual (1901-2010). Fuente: (NOAA, 2017).....	22
Figura 1.2	Montos anuales de precipitación (1901-2010). Fuente: (NOAA, 2017)	23
Figura 1.3	Líneas de tendencia e índice de correlación para las curvas de caudales vs. mm de precipitación para el río Atacames.....	27
Figura 1.4	Zonas geográficas de la ciudad de Atacames que se relacionaran por precipitaciones extremas	28
Figura 2.1	Cuenca hidrográfica del río Atacames, cantones aledaños y ubicación geográfica	38
Figura 2.2	Precipitación histórica, Atacames años 1901-2010. Fuente: (NOAA, 2017).....	41
Figura 2.3	Áreas de inundación de la cuenca hidrográfica del río Atacames.....	52

Figura 3.1	Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica inicial del río Toachi.....	64
Figura 3.2	Orden de corrientes de ríos y subcuencas de la cuenca hidrográfica inicial del río Toachi Referencia:(Farhan, Anbar, Enaba, & Al-Shaikh, 2015, p. 464)	72
Figura 3.3	Precipitación histórica mensual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013. Fuente: (NOAA, 2019).....	80
Figura 3.4	Precipitación histórica mensual, Pilaló años 1991-2015. Fuente: (INAMHI, 2019).....	80
Figura 3.5	Precipitación histórica anual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013. Fuente: (NOAA, 2019).....	82
Figura 3.6	Priorización de intervención hidrológica en las subcuencas - cuenca inicial del río Toachi.....	91
Figura 4.1	Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica inicial del río Toachi.....	105
Figura 4.2	Precipitación histórica mensual, cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013. Fuente: (NOAA, 2019).....	109
Figura 4.3	Precipitación histórica mensual, Pilaló años 1991-2015. Fuente: (INAMHI, 2019).....	109

Figura 4.4	Diagrama de caja mensual de la precipitación histórica de la cuenca inicial río Toachi, años 1901-2013 (NOAA, 2019).....	110
Figura 4.5	Precipitación mensual observada (obs) y modelada a 30 días (mod) para los años 1900 - 2100	111
Figura 4.6	Precipitación mensual observada (observ) y modelada a 20 días (modelo) para los años 1900 – 2100	112
Figura 4.7	Histograma de frecuencia para precipitación observada – modelada (GIS-E2-R-p1); cuenca inicial del río Toachi.....	114
Figura 4.8	Datos de precipitación observada (observ) vs. Modelada (gis = GIS-E2-R-p1) para los años 1901 – 2013; cuenca inicial del río Toachi.....	115
Figura 4.9	Normalidad de residuales de los valores observados y del modelo GIS-E2-R-p1.....	119
Figura 4.10	Varianza de residuales de los valores observados y el modelo GIS-E2-R-p1.....	120
Figura 5.1	Galápagos, Fuente: National Geographic World Map.	134

Figura 5.2	Temperatura histórica mensual, Galápagos años 1965-2019. Fuente: (Charles Darwin Foundation, 2020)	138
Figura 5.3	Diagrama de caja mensual de humedad histórica de la cuenca inicial río Toachi, años 1965-2020 (Charles Darwin Foundation, 2020)	138
Figura 5.4	Precipitación histórica mensual, Islas Galápagos, años 1965-2020. Fuente: (Charles Darwin Foundation, 2020)	139
Figura 5.5	Anomalías de precipitación mensual, Islas Galápagos, años 1965-2020. Fuente: (Charles Darwin Foundation, 2020)	140
Figura 5.6	Histograma de frecuencia para: temperatura del mar – temperatura media del aire; Galápagos	142
Figura 5.7	Relación entre la temperatura del mar y la temperatura media aire, Galápagos 1965-2020	143
Figura 5.8	Normalidad de residuales de los valores t_{mar}/t_{media_aire}	147
Figura 5.9	Varianza de residuales de los valores t_{mar}/t_{media_aire}	148

Figura 5.10	tmedia_aire, (1965-2020) vs. modelo HadGEM2-AO (1965-2100). Galápagos	152
Figura 5.11	Histograma de frecuencia para la t_media aire Galápagos – modelo (HadGEM2-AO)	153
Figura 5.12	Datos de t_media aire observada (observado) vs. modelo (HadGEM2-AO) para los años 1965 – 2019; Galápagos	154
Figura 5.13	Normalidad de residuales de los valores observados y del modelo GIS-E2-R-p1.....	158
Figura 5.14	Varianza de residuales de los valores observados y el modelo GIS-E2-R-p1.....	158
Figura 5.15	Precipitación observada Galápagos (1965-2020) vs. modelo GIS-E2-R-p1 (1965-2100).....	161
Figura 5.16	Histograma de frecuencia mensual para la precipitación observada de Galápagos – modelo (GIS-E2-R-p1).....	162
Figura 5.17	Datos de precipitación observada (observado) vs. modelo (GIS-E2-R-p1) para los años 1965 – 2019; Galápagos	163

Figura 5.18 Normalidad de residuales de los valores observados y del modelo GIS-E2-R-p1.....	167
Figura 5.19 Varianza de residuales de los valores observados y el modelo GIS-E2-R-p1.....	168

Este libro se terminó
de imprimir en el mes de agosto
del 2022, bajo el sistema
de revisión de pares.

 Centro de
Publicaciones
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

Las necesidades de datos técnicos encontrados en zonas campesinas e indígenas económicamente vulnerables, en el trajinar de 13 años de proyectos de responsabilidad social, ha motivado el estudio de: geología, geomorfología, hidrología y climatología de zonas como: la cuenca del río Atacames y la cuenca inicial del río Toachi; mediante tecnologías de: sensores remotos, GIS y software R; con el fin de utilizar estos datos en proyectos de riego comunitario, agua de consumo humano y ordenamiento territorial. El lector debe motivarse al estudio Hidrogeológico de zonas vulnerables a inundaciones sequía y cambio climático. La información le servirá transversalmente para el diseño hidráulico de obras de ingeniería, que mejoren la calidad de vida de sus habitantes.

El estudio define los caudales máximos por Fenómeno “El Niño” y las zonas susceptibles de inundación en la cuenca del río Atacames incluyendo zonas pobladas. En la cuenca inicial del río Toachi, se utilizó un método para identificar zonas de restauración hidrológica de pajonales andinos. En las Islas Galápagos y la cuenca inicial del río Toachi, se proponen modelos climáticos de precipitación y temperatura para los años 2020 a 2100, que evidencian el cambio climático que sufrirán las zonas mencionadas.

