

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Categorización de precipitaciones en Ecuador durante la ocurrencia del
Fenómeno de El Niño
INGE-2616

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Oceanográfico

Presentado por:

Isaac Homero Macías Núñez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Para quienes ya no están.

Agradecimientos

Eternamente agradecido con Alexandra quien dejo de vivir un poco para que yo lo pueda seguir haciendo bien.

A Joshia y Allison por cargar con una cruz que no debieron y apoyarme siempre que lo necesite.

Para mi papá, Homero, que espero me estés viendo donde sea que estés ahora.

Para todos mis amigos y compañeros de carrera, en especial a Eduarda y Xiomara durante este periodo del proyecto.

De la manera más genuina a máster Jonathan por su constante apoyo, así como a la Dra. Marín, la Dra. Cornejo, la Dra. Borbor, el Dr. Martillo y máster Cervantes que juntos permitieron que la oceanografía se inculque en mí de la mejor manera y me agrade.

Agradezco al equipo de CIIFEN, quienes depositaron su confianza en mí y me guiaron con sus mejores ideas, en especial al ingeniero Felipe.

Para las personas que he conocido en el camino y me han aceptado como soy, en especial a Angie.

A mis lomitos Sol, Luna y Ellie, en especial a esta última que me acompaña siempre.

Declaración Expresa

Yo, Isaac Homero Macías Núñez, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 de agosto del 2024.



Isaac Homero Macías Núñez

Evaluadores

Jorge Washington Espinoza Amaguaña

Profesor de Materia

Jonathan Marcelo Cedeño Oviedo

Tutor de proyecto

Resumen

El fenómeno de El Niño es un evento climático de gran impacto para el cual Ecuador debe estar en constante preparación, dado su influencia significativa en variables como la precipitación. Este estudio se centra en clasificar las precipitaciones en Ecuador durante los eventos de El Niño, analizando su variabilidad mediante la aplicación de técnicas estadísticas como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y las funciones ortogonales empíricas (EOF). El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el entorno de Jupyter, lo que permitió una eficiente aplicación de la ciencia de datos para manejar grandes volúmenes de información de la base de datos CHIRPS. A través de una clasificación basada en los antecedentes de El Niño, en conjunto con otras variables climáticas y una regionalización de los datos, se determinó que las precipitaciones en la región Costa están fuertemente influenciadas por este fenómeno. La región Sierra presenta una influencia parcial, especialmente en su estribación occidental, mientras que, en la Amazonía, las precipitaciones no muestran una influencia significativa. El análisis integral de los resultados obtenidos demuestra que las herramientas y metodologías utilizadas en este trabajo son eficaces y tienen un gran potencial para innovar en futuros estudios.

Palabras Clave: El Niño, SPI, CHIRPS, Variabilidad, Jupyter.

Abstract

El Niño phenomenon is an impactful event for which Ecuador must continuously prepare, given its significant influence on climatic variables such as precipitation. This study focuses on classifying precipitation patterns in Ecuador during El Niño events, analyzing their variability through the application of statistical techniques such as the Standardized Precipitation Index (SPI) and EOF. Data processing was conducted in the Jupyter environment, enabling the efficient application of data science to handle large volumes of precipitation data from the CHIRPS database. Through a classification based on El Niño's historical records, along with other climatic variables and a regionalization of the data, it was found that rainfall in the Coastal region is heavily influenced by this phenomenon. The Sierra region shows a partial influence, particularly in its western slopes, while the Amazon region's precipitation appears largely unaffected. The comprehensive analysis of the obtained results demonstrates that the tools and methodologies used in this study are effective and hold significant potential for innovation in future research.

Keywords: El Niño, SPI, CHIRPS, Variability, Jupyter

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Marco Teórico	5
1.4.1. El Niño Oscilación del Sur (ENOS)	5
1.4.2. Fenómeno de El Niño	6
1.4.3. Definición de El Niño	7
1.4.4. Impactos de El Niño en el territorio ecuatoriano	8
1.4.5. Precipitación acumulada	9
1.4.6. Técnicas estadísticas a implementar	10
Capítulo 2	14
2. Metodología	15
2.1. Área de Estudio	16
2.2. Revisión de base de datos: CHIRPS	17
2.3. Análisis de datos	17
2.3.1. Entorno Jupyter	17

2.3.2. Análisis e identificación de eventos El Niño según intensidad	18
2.4. Regionalización	19
2.5. Propuesta de clasificación	21
2.6. Análisis Espacio-Temporal.....	23
2.6.1. Precipitación Acumulada	23
2.6.2. Funciones Ortogonales Empíricas.....	23
2.6.3. Índice Estandarizado de Precipitación	24
2.6.4. Quintiles	26
Capítulo 3.....	28
3. Resultados y análisis	29
3.1. Funciones ortogonales empíricas.....	29
3.2. Índice Estandarizado de Precipitación.....	32
3.3. Análisis de quintiles de precipitación.....	35
3.3.1. Región Costa	35
3.3.2. Región Sierra.....	37
3.3.3. Región Amazonía	39
3.3.4. Región Insular	40
3.3.5. Análisis espacial de quintiles para Ecuador Continental	43
3.3.6. Análisis espacial de quintiles para la región Insular	44
3.4. Análisis de costos	46
Capítulo 4.....	49
4. Conclusiones y recomendaciones	50
4.1. Conclusiones.....	50
4.2. Recomendaciones	52
5. Bibliografía	53

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
CIIFEN	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
TSM	Temperatura Superficial de Mar
ONI	Índice Oceánico de El Niño
SPI	Índice Estandarizado de Precipitación
EOF	Funciones Ortogonales Empíricas
JJA	Periodo correspondiente a los meses de junio, julio y agosto
SON	Periodo correspondiente a los meses de septiembre, octubre y noviembre
DJF	Periodo correspondiente a los meses de diciembre, enero y febrero
MAM	Periodo correspondiente a los meses de marzo, abril y mayo

Simbología

mm	Milímetro
km	Kilómetro
°C	Grados Celsius
m	Metro

Índice de figuras

Figura 1 <i>Fases del evento ENOS</i>	5
Figura 2 <i>Regiones El Niño</i>	6
Figura 3 <i>Índice ONI</i>	7
Figura 4 <i>Índice Costero El Niño (ICEN)</i>	8
Figura 5 <i>Diagrama de quintiles</i>	13
Figura 6 <i>Esquema metodológico del proyecto</i>	15
Figura 7 <i>Área de Estudio</i>	16
Figura 8 <i>Límites de Influencia de El Niño</i>	20
Figura 9 <i>Implementación de análisis de quintiles</i>	27
Figura 10 <i>Diagramas de fase correspondientes a la estación seca</i>	30
Figura 11 <i>Diagramas de fase correspondiente a la estación húmeda</i>	31
Figura 12 <i>Compuesto de eventos El Niño débiles y moderados</i>	32
Figura 13 <i>Compuesto de eventos El Niño fuertes tipo I y II</i>	33
Figura 14 <i>Compuesto de eventos El Niño muy fuertes</i>	34
Figura 15 <i>Quintiles de precipitación, estación de verano en la Costa</i>	35
Figura 16 <i>Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Costa</i>	36
Figura 17 <i>Quintiles de precipitación, estación de verano en la Sierra</i>	37
Figura 18 <i>Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Sierra</i>	38
Figura 19 <i>Quintiles de precipitación, estación de verano en la Amazonía</i>	39
Figura 20 <i>Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Amazonía</i>	40
Figura 21 <i>Quintiles de precipitación, estación de verano, región Insular</i>	41
Figura 22 <i>Quintiles de precipitación, estación de invierno, región Insular</i>	42
Figura 23 <i>Matriz de compuestos de quintiles según clasificación propuesta en continente</i>	43
Figura 24 <i>Matriz de compuestos de quintiles, clasificación propuesta en el archipiélago</i>	44

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Clasificación del SPI</i>	11
Tabla 2	<i>Eventos El Niño clasificados según su intensidad</i>	18
Tabla 3	<i>Referencia de eventos pertenecientes a la serie de tiempo disponible según CHIRPS</i> ...	19
Tabla 4	<i>Pérdidas por el fenómeno de El Niño en Ecuador</i>	21
Tabla 5	<i>Propuesta de clasificación de los eventos El Niño</i>	22
Tabla 6	<i>Porcentaje de variabilidad explicada por los 7 primeros modos</i>	29
Tabla 7	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano en la Costa</i>	35
Tabla 8	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Costa</i>	36
Tabla 9	<i>Rangos de precipitación por quintil la estación de verano en la Sierra</i>	37
Tabla 10	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Sierra</i>	38
Tabla 11	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano en la Amazonía</i>	39
Tabla 12	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Amazonía</i>	39
Tabla 13	<i>Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano, Insular</i>	40
Tabla 14	<i>Rangos de precipitación por quintil la estación invernal, Insular</i>	41
Tabla 15	<i>Detalle de recursos humanos participantes del proyecto</i>	46
Tabla 16	<i>Detalle de implementaciones/herramientas utilizadas en el proyecto</i>	46
Tabla 17	<i>Automatización de productos/servicios en la web</i>	47
Tabla 18	<i>Mantenimiento de la automatización posterior al primer año</i>	48

Capítulo 1

1. Introducción

A lo largo de los años el Fenómeno de El Niño ha tenido una presencia inalterable en el Ecuador, debido a su influencia en el sector productivo, sanitario y de infraestructura, entre otros. Estas repercusiones han impactado la economía ecuatoriana, afectando a poblaciones rurales como urbanas; problemas sociales tales como el éxodo de comunidades en búsqueda de mejores oportunidades económicas para solventar a sus familias (CEPAL, 1998) o refugio debido a la incidencia de ciertos eventos atmosféricos como lluvias intensas (CAF, 2000), subrayan la influencia directa de El Niño en la vida de los ecuatorianos que, según su ubicación geográfica y nivel de vulnerabilidad, se ven obligados a cambiar sus rutinas cotidianas o medios de subsistencia mientras se da una ocurrencia de estos fenómenos.

También, el proyecto aporta al alcance del ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) número 13: Acción por el Clima, debido a que, en base a este análisis, es posible evaluar de mejor manera normativas y estrategias que giran en torno al fortalecimiento de la resiliencia y adaptación ante desastres naturales como especifica la meta 13.1. Este trabajo también enriquece el ODS 14: Vida Submarina, ya que, según las condiciones presentes tales como la influencia del Fenómeno de El Niño, se pueden implementar reglamentaciones y tecnologías que garanticen la sostenibilidad de los ecosistemas marinos que puedan encontrarse en un punto más sensible debido a las condiciones del clima.

1.1. Descripción del problema

Los eventos El Niño tienen un gran impacto en el territorio ecuatoriano, alterando variables climáticas como lo es la precipitación. Para prepararse y actuar de manera eficaz, es vital identificar los patrones y características específicos de cada evento, lo que hace imprescindible continuar con los estudios relacionados a este fenómeno.

Para poder mitigar o evaluar los efectos que conlleva la ocurrencia de los eventos El Niño, se han desarrollado distintas agendas con la finalidad de elaborar informes ejecutivos o planes de

acción que permitan establecer los lineamientos y objetivos necesarios para que la población pueda estar preparada, acorde al tipo de amenaza al que sea susceptible. En los años recientes, mediante una serie de resoluciones, se han establecidos planes de acción los cuales se basan en temas primordiales como la mitigación, el aumento del nivel de respuesta y la recuperación temprana (SGR, 2023), con la finalidad de que pueda haber una respuesta de primer nivel no solo por parte las instituciones en base a sus competencias, sino también a la población en general, de modo que se mantiene un actuar articulado que permita tener una mayor eficiencia en el empleo de los recursos disponibles, todo esto en el marco de reducir las consecuencias negativas que se generen.

No obstante, para prever con mayor precisión los efectos que El Niño puede tener en el país y la región, hay que partir reconociendo que los impactos de estos eventos difieren entre cada ocurrencia de manera significativa (Thielen, y otros, 2023) con un mayor énfasis en el comportamiento de las precipitaciones en la región, dado que estas son más frecuentes e intensas, si bien también se debe tener en consideración los biomas en donde se manifiestan (Penalba & Rivera, 2016).

Basado a lo mencionado anteriormente, se han realizado varios estudios cuyos objetivos, analizados de manera general y en conjunto, buscan identificar variables determinantes que rigen el comportamiento de variables meteorológicas como lo es la precipitación. Así pues, este trabajo explora y condensa mediante técnicas estadísticas y la programación, históricos de precipitación que han ocurrido durante los eventos El Niño en Ecuador, clasificándolos en base a ciertos criterios y relacionándolos a las evidencias registradas.

1.2. Justificación del problema

El fundamento de este trabajo es el de realizar una caracterización de los eventos El Niño que han ocurrido en el territorio ecuatoriano en función de las precipitaciones, partiendo de definiciones establecidas y apoyándose en la evidencia de los efectos que cada evento ha tenido en las diferentes regiones del país (Insular, Costa, Sierra y Amazonía).

Se han realizado estudios tales como el trabajo de (Mora & Willems, 2012) en áreas específicas del país que relacionan variables de temperatura con precipitación en la zona adyacente al río Paute, mientras que en el estudio de (Morán-Tejeda, y otros, 2016) se presenta evidencia de la influencia de El Niño Oscilación Sur (ENOS) en las precipitaciones del Ecuador mediante una serie de estaciones ubicadas en distintos puntos del país que, si bien implementan metodologías diferentes, aportan con información importante respecto a cómo es el régimen de lluvias en áreas específicas.

En este caso, se usará data correspondiente a la extensión de todo el país, por lo que se podrá analizar de manera general las variaciones climáticas en cada región, permitiendo caracterizar las precipitaciones y ligarlas a otros estudios que permitan complementar el porqué del comportamiento durante un determinado periodo de tiempo. Esto permitirá que, en investigaciones futuras, se puedan usar los resultados posteriores como una referencia adicional, sea para alimentar algún modelo, comparación de datos o toma de decisiones, así como permitir a instituciones o actores pertinentes realizar productos acordes a sus competencias.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Clasificar el impacto de El Niño en las precipitaciones mediante la aplicación de técnicas estadísticas y programación, con el fin de identificar patrones de comportamiento en la distribución y variabilidad de las precipitaciones en Ecuador.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Implementar el Índice Estandarizado de Precipitación trimestral para la identificación de señales o patrones específicos en cada región del Ecuador durante los eventos El Niño.
- b) Analizar la estructura de los datos de precipitación para la serie de tiempo disponible para identificar características únicas inherentes a los eventos El Niño.

- c) Determinar la existencia de variabilidad regional en las precipitaciones durante los eventos El Niño, identificando aquellas regiones que pueden tener una mayor respuesta o sensibilidad.
- d) Evaluar si la base de datos CHIRPS permite obtener resultados concluyentes con el solo uso de sus datos de precipitación para la región Insular en el contexto de análisis.
- e) Proponer posibles implementaciones y aplicaciones futuras basadas en los resultados obtenidos, considerando el alcance y limitaciones de los resultados.

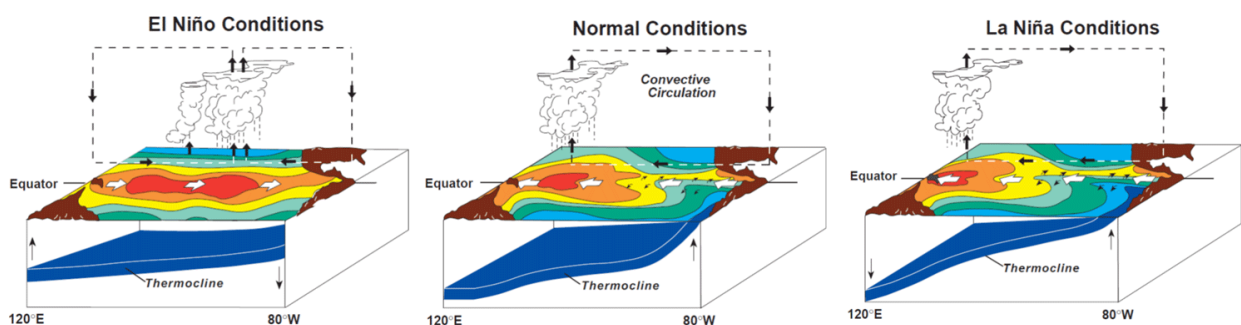
1.4. Marco Teórico

1.4.1. *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)*

El Niño Oscilación Sur (ENSO por sus siglas en inglés), es un patrón cíclico referente a una variabilidad océano atmosférica que se da en escalas interanuales (Trenberth & Stepaniak, 2001), manifestándose en el Pacífico ecuatorial central y oriental mediante un calentamiento o enfriamiento de las aguas. Esta oscilación entre temperaturas frías y cálidas es a lo que se refiere el evento ENOS, este tiene una incidencia directa en las lluvias, sea su intensidad o distribución geográfica, cuya área de influencia alcanza varias partes del mundo, se encuentra compuesto por tres fases (L'Heureux, 2014): La fase cálida llamada El Niño, la fría que es La Niña, ambas manifestadas por anomalías positivas y negativas de temperatura superficial del mar, respectivamente y una fase neutral, en la que dichos valores son muy cercanos al promedio.

Figura 1

Fases del evento ENOS



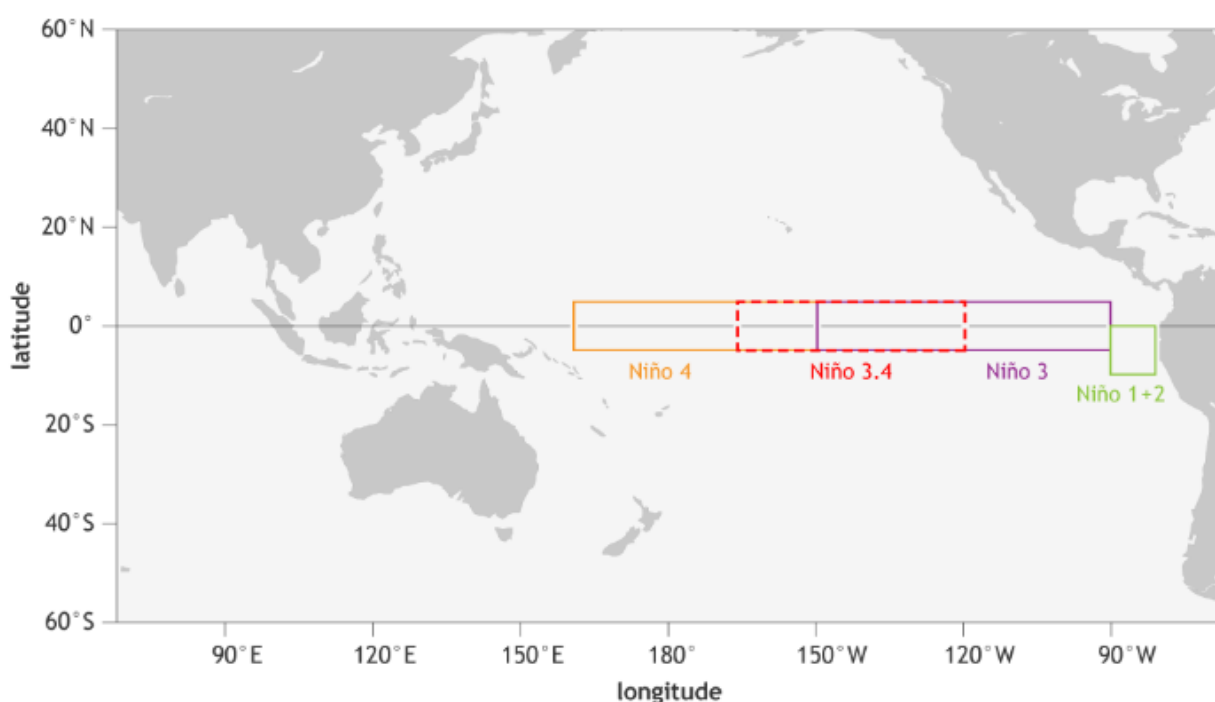
Fuente: (Talley, Pickard, Emery, & Swift, 2011)

1.4.2. Fenómeno de El Niño

El Niño corresponde a la fase cálida de ENOS, que tienen una frecuencia irregular entre dos a siete años, su característica principal es que describe un inusual calentamiento de las aguas superficiales del océano Pacífico Tropical, en el que los vientos Alisios, que normalmente soplan de este a oeste, se debilitan o se invierten (L'Heureux, 2014), por lo que el gradiente de temperatura tiene dirección hacia el este. Las aguas superficiales profundizan la termoclina, lo que no imposibilita el proceso de surgencia como normalmente ocurriría; esto finalmente tiene efectos de magnitud en los procesos biológicos, económicos y sociales en las zonas que se encuentran dentro del área de influencia, en especial en las poblaciones de Ecuador y Perú (NOAA, 2023).

Figura 2

Regiones El Niño



Nota. Ubicación de las áreas o regiones del Pacífico Tropical empleadas para el monitoreo de la temperatura superficial del mar. Fuente: (NOAA)

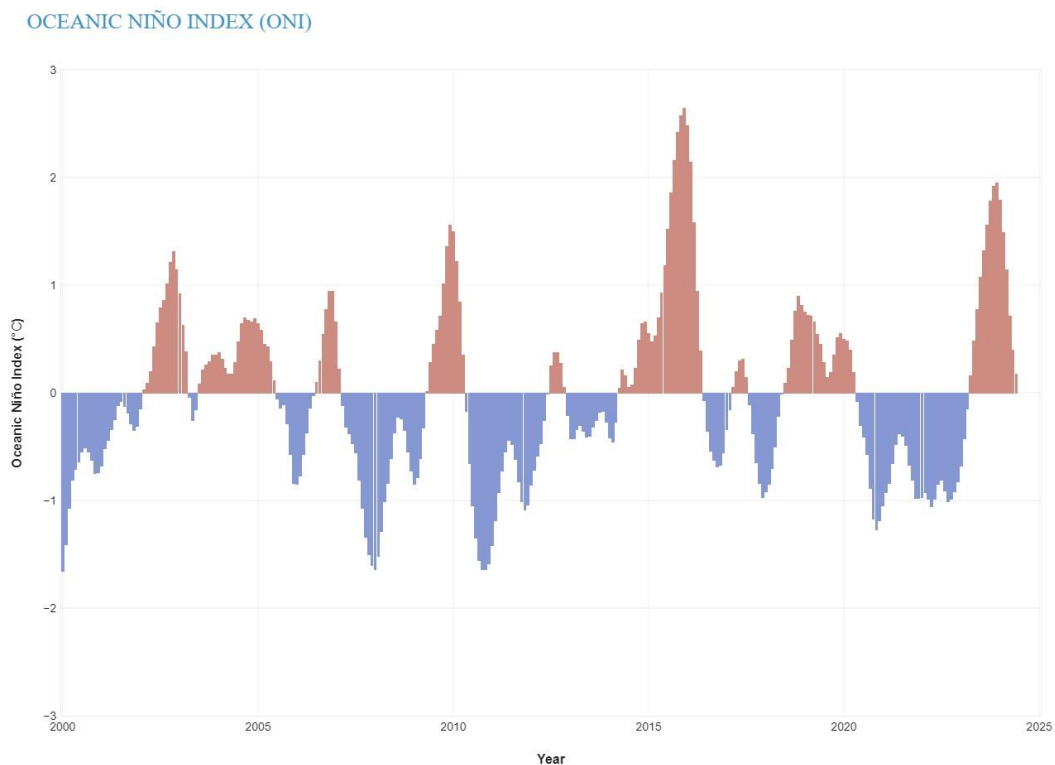
1.4.3. Definición de El Niño

1.4.3.1. Índice ONI.

Es el principal indicador del monitoreo del componente oceánico del patrón climático ENOS, este índice calcula el promedio corrido de tres meses de las anomalías de TSM de la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), esto respecto a una climatología de los últimos treinta años, actualizada cada cinco. Se define un evento El Niño cuando las anomalías en la zona son superiores a 0.5°C por cinco períodos seguidos, si ocurre lo mismo, pero con anomalías inferiores a -0.5°C, corresponde a la fase fría del ENOS o La Niña (Lindsey, 2009).

Figura 3

Índice ONI



Nota. Índice ONI, es posible apreciar las oscilaciones entre la fase cálida y fría.

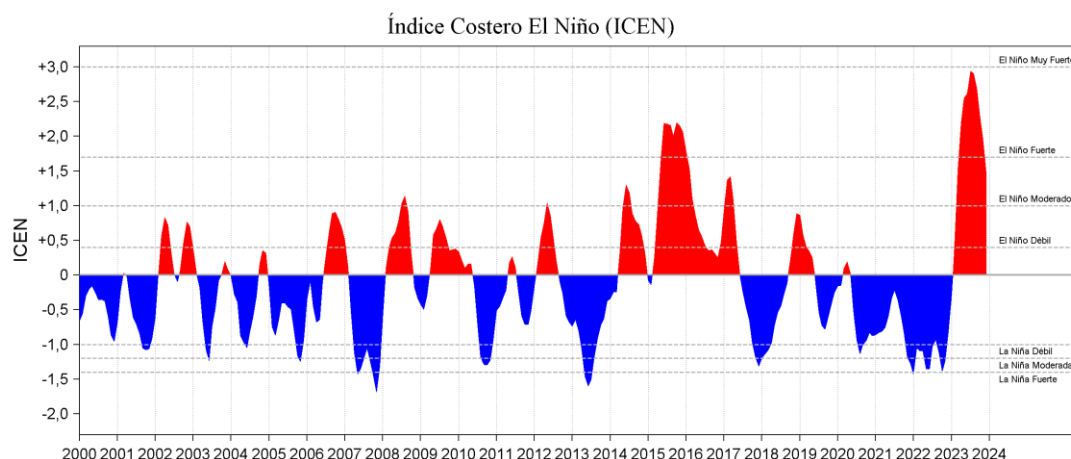
Fuente: (Lindsey, 2009).

1.4.3.2. Índice ICEN

El Índice Costero El Niño, se calcula en la región adyacente a las costas de Ecuador y Perú (Niño 1+2) mediante la media corrida de tres meses de las anomalías de TSM con respecto a la climatología para un periodo de treinta años, 1981 hasta 2010. Al tener al menos tres periodos consecutivos con anomalías mayores a 0.4 °C, se establece la presencia de un Niño (Takahashi , Mosquera, & Reupo, 2014). Esta región es importante para el monitoreo de El Niño ya que las condiciones océano-atmósfera pueden ser más representativas que la región 3.4, (CIIFEN, 2022) considerando su cercanía y posibles efectos que puede tener en los países del borde costero de Sudamérica (como Ecuador y Perú).

Figura 4

Índice Costero El Niño (ICEN)



Nota. Anomalías de ICEN que corresponde a la región Niño 1+2. Fuente: (ENFEN, 2012); (Takahashi , Mosquera, & Reupo, 2014)

1.4.4. Impactos de El Niño en el territorio ecuatoriano

Los efectos de El Niño en Ecuador tienen un impacto considerable el cual se extiende a diversas áreas como el clima, salud, economía, agricultura, ganadería y la sociedad en general. En el marco climático, en la región costera del país, se tiene un aumento significativo de las precipitaciones (Zambrano-Mera, Rivadeneira-Vera, & Pérez-Martín, 2018) lo que puede resultar

en inundaciones, en especial en las zonas bajas (llanuras de inundación). En la región interandina, la incidencia de El Niño en las precipitaciones no se manifiesta de manera homogénea, en el estudio de Villacis Erazo (2002), mediante 20 estaciones meteorológicas ubicadas en esta región con una serie de tiempo de 1965 a 1998, observó durante el trimestre de junio-julio-agosto una reducción significativa en las precipitaciones bajo la ocurrencia de El Niño, análisis consistente con lo evidenciado en el trabajo de Rossel (1997); estas condiciones conllevan un incremento en la dificultad para la agricultura y alteraciones en la distribución del agua (CAF, 2000); (Vicente-Serrano, y otros, 2016).

Las pesquerías se ven gravemente afectadas a gran escala debido a los cambios en los patrones de migración de especies marinas, como la anchoveta, que son forzadas a desplazarse por las alteraciones en las condiciones habituales del agua, tales como la temperatura y la disponibilidad de alimento. Estos cambios, a su vez, impactan a mamíferos y aves que dependen de estos peces para su supervivencia (Bertrand, y otros, 2020).

También debido al aumento considerable de las precipitaciones, es de esperar que existan graves afecciones en la infraestructura del país, por lo que se tienen importantes pérdidas económicas debido a los costos de mantenimiento y compensación (Vos, Velasco, & De Labastida, 1999), esto suele ir ligado a efectos negativos significativos a la población, tales como pérdidas humanas y materiales (IFRC, 2023), lo que ha llevado a la implementación de sistemas de alerta temprana, modelos predictivos, entre otras técnicas.

1.4.5. Precipitación acumulada

Es una cuantificación la cual señala que tanta lluvia, rocío, o nieve ha caído en un periodo de tiempo y una región referencial (González & Casallas, 2014), esta permite indicar como ha sido la precipitación en un lapso de semanas, meses o años, según una climatología de treinta años, idealmente.

El rango de volumen de precipitación en territorio ecuatoriano es muy variado, donde en determinadas regiones, las observaciones pueden ser mayores a 6000 mm, mientras que en otras estas no superan los 100 mm (Nouvelot, Le Goulven, Pourrut, & Alemán, 1995), se comprende que desde la costa del océano Pacífico hasta los límites de la región andina, el volumen de precipitación aumenta en dirección oeste a este, mientras que en la región que comprende a la cordillera de los Andes, las lluvias tienden a tener una menor intensidad aunque son más duraderas.

Para la región insular las precipitaciones se ven influenciadas por las corrientes oceánicas y la altura, donde las zonas bajas tienen una mayor incidencia de pluviosidad durante la época húmeda, mientras que, en la estación seca, debido a la influencia de la corriente de Perú, ocurre lo contrario (Gibson, 2016). La región amazónica se considera como un clima mega térmico húmedo, por lo que se esperan pluviosidades importantes, así como altos índices de humedad relativa (Nouvelot, Le Goulven, Pourrut, & Alemán, 1995).

1.4.6. Técnicas estadísticas a implementar

1.4.6.1. Funciones ortogonales empíricas

Las funciones ortogonales empíricas (EOF por sus siglas en inglés), son empleadas para estimar posibles patrones temporales y espaciales de variabilidad climática respecto al tiempo. En contexto del análisis del clima, el análisis de estas ha permitido el descubrimiento de procesos como la Oscilación Decadal del Pacífico. Así como en el análisis de Fourier o de *wavelets*, la base metodológica es la de proyectar las observaciones o datos de manera ortogonal (Zhang & Moore, 2015). Este análisis está diseñado para encontrar la variabilidad dentro de un conjunto de datos, creando un nuevo set de variables que describen la mayor varianza de las observaciones. Los EOF pueden describir patrones en el tiempo y espacio que reflejan una similitud en la estructura de los datos respecto a la variabilidad obtenida, lo que facilita el entendimiento del comportamiento de un evento o fenómeno en el tiempo y según las variables implementadas (Martinson, 2018).

1.4.6.2. Índice Estandarizado de Precipitación

El SPI, por sus siglas en inglés, es un índice utilizado para la evaluación de eventos de sequía en una escala determinada de tiempo, este transforma la precipitación acumulada en un valor estandarizado según una distribución normal, es decir, esto permite que la estandarización de la precipitación sea proporcional de manera lineal a un déficit de lluvia (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), esta se la puede aplicar a escalas de tiempo de 3, 6, 12, 24 o 48 meses, dependiendo del objeto de estudio. Sus valores son adimensionales y normalmente se asocian de manera que para valores negativos se relaciona con déficit o sequías mientras que valores positivos son vinculados a una abundancia en las precipitaciones. (Keyantash, 2023). Los valores normalmente se encuentran entre -2.5 a 2.5, sin embargo, pueden ser menores o mayores a ese margen. McKee presenta la siguiente clasificación, que es en la que la mayoría de estudios se basa para categorizar los distintos márgenes tal como presenta la siguiente tabla:

Tabla 1

Clasificación del SPI

<i>SPI</i>	<i>Clasificación</i>
2.0 >	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
0 a 0.99	Normal
0 a -0.99	Sequía ligera
-1 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa

Nota: Márgenes de clasificación del índice estandarizado de precipitación. Fuente: (Suryanarayana & Malakiya, 2016)

El índice estandarizado de precipitación ha sido ampliamente utilizado en la comunidad científica para el estudio de los regímenes de precipitaciones para una región en particular, siendo uno de sus fines el de también poder calibrar o validar data u observaciones provenientes de

satélites según mediciones con estaciones *in situ* como en el estudio de Zhu y otros (2019) o de Zambrano, Wardlow, Tadesse, Lillo y Lagos (2017) de modo que el desarrollo de técnicas de teledetección pueda ser más preciso y eficiente.

El SPI es un índice realmente útil para determinar el inicio y fin de periodos de intensa precipitación o sequías (Oliveira Neces & Nogueira Vilanova, 2021) (Radia, Kamila, & Abderrazak, 2021) en distintas partes del mundo; algunos autores recomiendan la implementación de la distribución de Pearson (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) (Guttman, 1999), mientras que otros prefieren el uso de la distribución gamma (Lloyd-Hugues & Saunders, 2002), más para ambas distribuciones en algunos casos se ha estimado que no hay diferencias entre estas distribuciones (Constantino Blain, 2011).

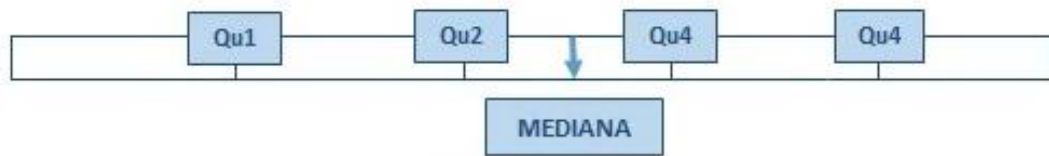
Hay que considerar que una desventaja del SPI es que la precipitación es la única variable considerada, dejando fuera del análisis, al menos a nivel de cálculo, otros parámetros o eventos que podrían tener una alta influencia en cómo se comportan las precipitaciones.

1.4.6.3. Análisis de quintiles

El análisis de quintiles es una medida de posición la cual ordena de menor a mayor y agrupa las observaciones en grupos de tamaño similar (Rodríguez-Ojeda, 2007), para este caso en cinco partes, con un aproximado del 20% de los datos por quintil. En el marco de la climatología, el análisis de quintiles permitiría asociar un determinado rango de precipitaciones con distintos niveles de impacto, como en los informes ejecutivos de (INAMHI, 2012) donde se realiza un seguimiento a las observaciones de lluvia y sus efectos en el Guayas.

Figura 5

Diagrama de quintiles



Nota. Estructura del análisis de quintiles, (Rus-Arias, 2021).

Donde, aproximadamente:

- Primer Quintil 1: A la izquierda de Qu1 (0.2) se encuentra el 20% de los datos.
- Segundo Quintil 2: A la izquierda de Qu2 (0.4) se encuentra el 40% de los datos.
- Tercer Quintil 3: A la izquierda de Qu3 (0.6) se encuentra el 60% de los datos.
- Cuarto Quintil 4: A la izquierda de Qu4 (0.8) se encuentra el 80% de los datos.
- Quinto Quintil 5: A la derecha de Qu4 (0.8) se encuentra el 20% restante de los datos.

Capítulo 2

2. Metodología

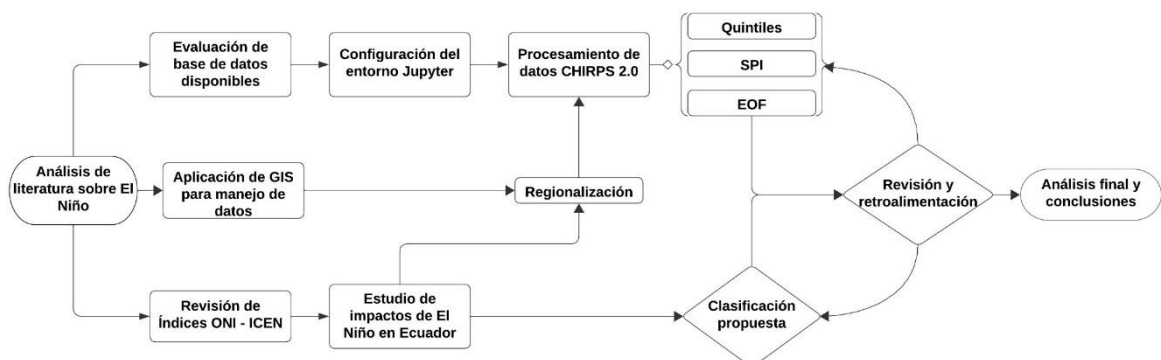
La investigación del fenómeno El Niño es fundamental para el conocimiento de sus efectos en la sociedad ecuatoriana, el poder identificar el comportamiento de cada evento permitiría anticipar sus impactos y entender de manera más clara como se comporta y varía el clima de nuestra región.

El enfoque metodológico de este proyecto incluye un diagrama de flujo que ilustra claramente cada paso del proceso, desde la recopilación de datos hasta el análisis final. Este diagrama es una herramienta esencial para asegurar que cada etapa del estudio esté alineada con los objetivos de la investigación y que los resultados obtenidos sean coherentes y reproducibles. Además, la claridad y la estructura proporcionadas por este diagrama permiten que el estudio sea replicado y ampliado en futuras investigaciones.

El proceso metodológico de este proyecto consistió en el siguiente diagrama de flujo mostrado a continuación:

Figura 6

Esquema metodológico del proyecto



2.1. Área de Estudio

El área de estudio seleccionado fue el de todo el territorio de Ecuador, es decir, el archipiélago de Galápagos y el Ecuador continental con una totalidad de 264380 km^2 aproximadamente entre ambas masas de tierra. Para el propósito del proyecto, se dividió el área en las regiones según la división política del país¹, las que serían Galápagos, Costa, Sierra y Amazonía de la siguiente manera:

Figura 7

Área de Estudio



Fuente: (Macleod, Knapp, Gregory, & Pozo, 2016)

1. Se consideran como provincias del litoral: Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, Guayas, Santa Elena, Los Ríos y El Oro.
2. Provincias de la región andina: Carchi, Ibarra, Pichincha, Cotopaxi, Bolívar, Chimborazo, Imbabura, Cañar, Azuay y Loja.
3. Provincias de la Amazonía: Sucumbios, Orellana, Napo, Pastaza, Morona-Santiago y Zamora Chinchipe.
4. Galápagos conforma la región Insular.

¹ Debido a que el shapefile utilizado para extraer la data es del año 2015, no se toman en consideración los territorios no delimitados de: Manga del Cura, El Piedrero y la Golondrina.

2.2. Revisión de base de datos: CHIRPS

Para la selección de datos de precipitación, se evaluaron varias opciones considerando su resolución espacial y temporal, así como sus limitaciones inherentes. Finalmente, se optó por los datos de CHIRPS (Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data) debido a su alta fiabilidad en el manejo de grandes volúmenes de datos. Según (Funk, Peterson, Landsfeld, & et al., 2015), CHIRPS combina observaciones satelitales con datos in-situ, ofreciendo una cobertura temporal que se remonta a 1981, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para el análisis de tendencias climáticas a largo plazo. Además, su resolución espacial de 0.05° (~5 km entre puntos de grilla) permite un análisis detallado a nivel regional, lo que es crucial para estudios en áreas con una topografía compleja como Ecuador. La confiabilidad y la versatilidad de CHIRPS lo destacan frente a otras bases de datos de precipitación, especialmente en regiones con datos limitados.

2.3. Análisis de datos

2.3.1. Entorno Jupyter

Para la preparación y análisis de datos, se utilizó Python dentro del entorno Jupyter, un entorno versátil que permite la integración de diversas bibliotecas de distintos lenguajes de programación. Python fue elegido por su robusto ecosistema de librerías, como *Pandas*, *NumPy* y *Matplotlib*, que facilitan el procesamiento de datos, el análisis estadístico y la visualización tanto parcial como completa de los resultados. Este enfoque permite un análisis flexible y reproducible, optimizando el flujo de trabajo desde la extracción de datos hasta la interpretación final. La versatilidad e interacción para la aplicación en la ciencia permite un flujo de trabajo eficiente, manteniendo claridad a lo largo de todo el trabajo (Perkel, 2018).

Para la extracción de datos, se seleccionaron las latitudes y longitudes correspondientes al territorio ecuatoriano en el portal de CHIRPS. Posteriormente, se utilizó un shapefile del territorio ecuatoriano, obtenido del geoportal del Instituto Geográfico Militar de Ecuador, y mediante programación, se aplicó un filtro para aislar los datos dentro de las fronteras de Ecuador. En cuanto al rango temporal, se descargaron todos los años disponibles, abarcando desde 1981 hasta la actualidad, con el fin de analizar los eventos de El Niño registrados en la base de datos.

2.3.2. Análisis e identificación de eventos El Niño según intensidad

En la selección de los eventos El Niño a analizar, se consideraron los episodios cálidos (eventos El Niño) ocurridos en la zona El Niño 3.4 desde 1981, debido a nuestra base de datos CHIRPS, hasta la actualidad tal describe el índice ONI (Golden Gate Weather Services, 2024):

- Eventos débiles: Anomalías de TSM entre 0.5 y menores a 1°C.
- Eventos moderados: Anomalías de TSM entre 1°C y menores a 1.5°C.
- Eventos fuertes: Anomalías de TSM entre 1.5°C y menores a 2°C.
- Eventos extremos: Anomalías de TSM superiores a 2°C.

Tabla 2

Eventos El Niño clasificados según su intensidad

El Niño - 27			
Weak - 11	Moderate - 7	Strong - 6	Very Strong - 3
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16
1969-70	1986-87	1987-88	
1976-77	1994-95	1991-92	
1977-78	2002-03	2023-24	
1979-80	2009-10		
2004-05			
2006-07			
2014-15			
2018-19			

Nota. Clasificación de Eventos El Niño según su intensidad bajo el índice ONI (Oceanic Niño Index). Fuente: (Golden Gate Weather Services, 2024)

Por lo que posterior a la selección, se obtuvieron los siguientes eventos²:

² Para el análisis no se tomaron en consideración los periodos de 2014-2015 ni 1987-1988 dado que se estableció que en caso de que sea un evento prolongado, se tomaría el rango de tiempo con las anomalías de TSM más altas.

Tabla 3*Referencia de eventos pertenecientes a la serie de tiempo disponible según CHIRPS*

<i>Eventos según su intensidad (Bajo la definición de ONI)</i>	
<i>Eventos débiles</i>	2004-2005
	2006-2007
	2018-2019
<i>Eventos moderados</i>	1986-1987
	1994-1995
	2002-2003
	2009-2010
<i>Eventos fuertes</i>	1991-1992
	2023-2024
<i>Eventos extremos</i>	1982-1983
	1997-1998
	2015-2016

2.4. Regionalización

Idealmente, y para un alcance mayor, se debería implementar una regionalización que sea acorde a los diversos climas que tiene nuestro país, por ejemplo, las condiciones que se presentan en la península de Santa Elena no son las mismas a las que se encuentran en la región de Esmeraldas. Sin embargo, para este trabajo, se implementó una regionalización acorde a la división convencional que se aplica en nuestro país, es decir, las regiones de Costa, Sierra, Oriente e Insular, esto debido a la limitante de tiempo que se tiene en el proyecto, así como la disponibilidad de archivos vectoriales correspondientes a la división política del país. Aun así, para sustentar un poco más esta regionalización, una caracterización de regiones propuesta por Rossel (1997) explica que, en base a la influencia de El Niño en las precipitaciones, se obtienen las siguientes zonas de influencia:

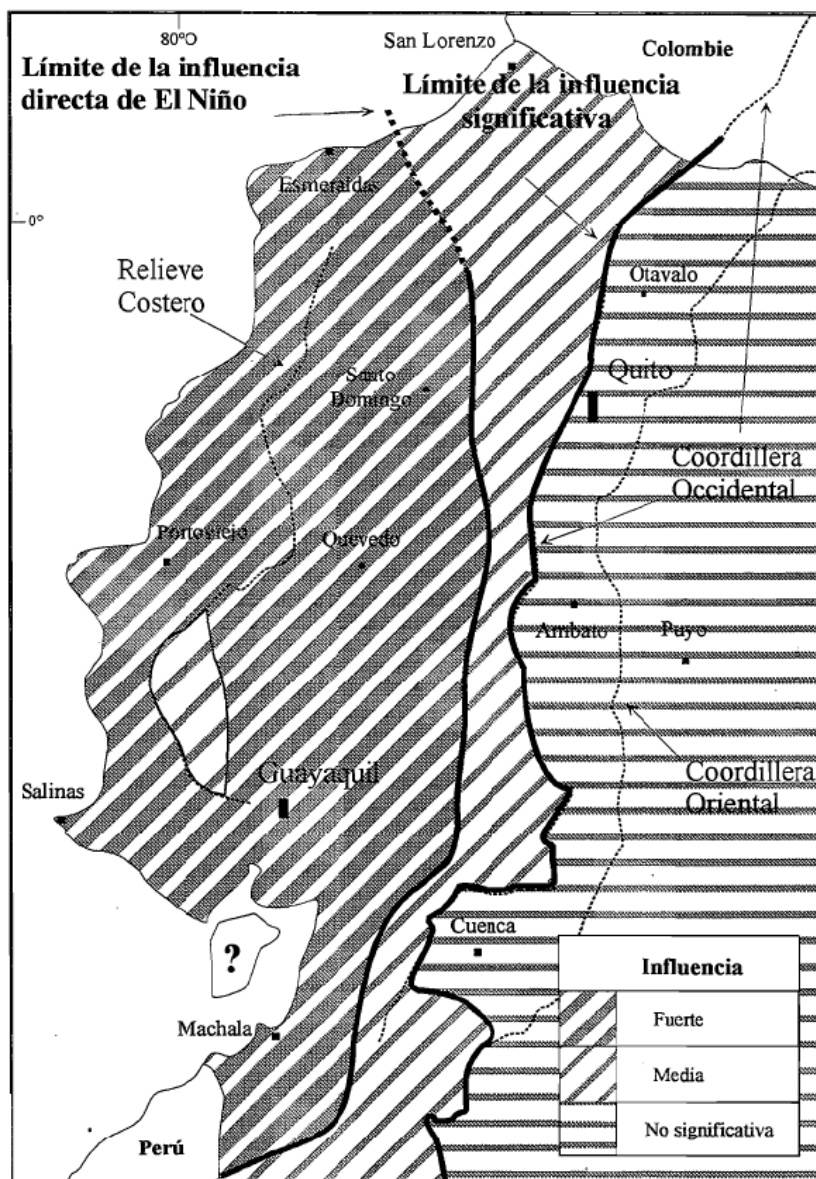
- Zona de influencia directa, la cual es correspondiente a la mayoría de la región litoral; la mayoría de eventos El Niño corresponde a un superávit de precipitaciones, con una fuerte correlación lineal de los valores de TSM en el Niño 1+2 y los índices pluviométricos.
- Zona de influencia significativa, que corresponde a la estribación occidental de la región andina y la región costera colindante con esta. En los algunos años Niño, se presenta un

superávit, pero este fenómeno no es la única causal para que se de dicho aumento en las precipitaciones.

- Zona de influencia no-significativa, referida a la región interandina y la Amazonía, sin importar si fue un año El Niño o no, se puede observar un aumento en las lluvias o un déficit relativo, por lo que no hay alguna diferencia o patrón entre estos años, además de que la correlación de la TSM de la región Niño 1+2 respecto a los índices de precipitación no es significativa.

Figura 8

Límites de Influencia de El Niño



Nota. Influencia de El Niño en la precipitación en Ecuador. (Rossel, 1997)

Para la región Insular, se considera que durante los eventos El Niño existe un aumento en las precipitaciones, siendo los meses más lluviosos febrero y marzo.

Como se mencionó inicialmente, esta regionalización no toma en cuenta las distintas áreas climáticas que se pueden encontrar incluso en una misma región, como lo prueba (Cedeño Oviedo, 2008) entre las condiciones de la Península y Esmeraldas, no obstante, permite tener una buena base e idea de lo que se puede esperar en cada zona, se puede complementar mediante otros productos y facilita un poco el procesamiento de los datos.

2.5. Propuesta de clasificación

La propuesta de eventos aplicada en este estudio, se basó en el examen de las condiciones de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y las anomalías en la región 3.4, así como en los valores observados en la zona 1+2, analizando cómo estas condiciones se manifiestan en las precipitaciones sobre el territorio ecuatoriano, con un enfoque particular en la Costa. Además, se consideró el impacto de los eventos de El Niño en la población ecuatoriana, evaluado a través de las pérdidas económicas y las afectaciones a las personas, según informes del (Banco Mundial, 2016); (CEPAL, 1998) ; (Ocles, 2018) tal que, por ejemplo:

Tabla 4

Pérdidas por el fenómeno de El Niño en Ecuador

Años de ocurrencia del fenómeno	Provincias con mayor afectación	Duración del evento	Personas afectadas	Pérdidas estimadas	Nota importante
1972-1973	Guayas, Esmeraldas, Los Ríos	Marzo 1972 hasta enero 1973	600	USD 450 millones ¹	10 meses de afectación directa del fenómeno
1982-1983	Zonas costeras bajas: Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos	Agosto 1982 hasta noviembre 1983	950.000	USD 1.051 millones ¹	La superficie total afectada a nivel nacional representó el 5% del territorio costero
1997-1998	Guayas, Manabí, Esmeraldas, El Oro, Los Ríos, Chimborazo, Azuay y Cañar	Octubre 1997 hasta junio 1998	93.500	USD 2.869 millones ²	Afectación del 15% del PIB al año 1998
2015-2016	Manabí, Esmeraldas, Guayas y Los Ríos	2015-2016	26.981	USD 3,2 millones ³	En Bolívar se afectaron 11,6 km de vías de comunicación; hubo 181 viviendas destruidas entre todas las provincias afectadas

Nota. Tabla de pérdidas económicas y número de personas afectadas personas (Banco Mundial, 2016); (CEPAL, 1998) ; (Ocles, 2018), nótese como los efectos del evento extremo 2015-2016, según ONI, no tuvo un volumen de pérdidas tan alto respecto a los otros eventos de la serie de tiempo analizada.

La propuesta de clasificación agrupó los eventos El Niño comparando su intensidad según el índice ONI, así como sus efectos en Ecuador continental, por ejemplo, si bien el evento de 1986-1987 tuvo anomalías de temperatura inferiores, a las del evento 2015-2016, sus efectos en el país fueron mucho más devastadores.

La clasificación diferencia los eventos fuertes tipo I y II de manera que:

- Eventos Fuertes Tipo I: Menores precipitaciones en la costa durante el invierno.
- Eventos Fuertes Tipo II: Mayores precipitaciones en la costa durante el invierno, es decir, mayor impacto en la población.

Tabla 5

Propuesta de clasificación de los eventos El Niño

<i>Clasificación</i>	<i>Eventos El Niño</i>
<i>Eventos Débiles</i>	2004-2005
	2006-2007
	2018-2019
<i>Eventos Moderados</i>	1994-1995
	2002-2003
	2009-2010
<i>Eventos Fuertes Tipo I</i>	2015-2016
	2023-2024
<i>Eventos Fuertes Tipo II</i>	1986-1987
	1991-1992
<i>Eventos Muy Fuertes</i>	1982-1983
	1997-1998

Nota. Propuesta de clasificación en base a los criterios mencionados.

2.6. Análisis Espacio-Temporal

2.6.1. Precipitación Acumulada

La implementación de la base de datos de CHIRPS en otras regiones del mundo ha tenido un desempeño realmente alto, en especial en escalas temporales más largas, siendo sus valores finalmente validados con estaciones *in-situ* (Dinku, y otros, 2018); en longitudes más cercanas a Ecuador, algunos trabajos como el de (Ocampo-Marulanda, y otros, 2022) compararon y validaron los datos de CHIRPS con estaciones meteorológicas ubicadas en el suroeste de Colombia, identificando también patrones de comportamiento respecto a ciertas variables como desempeño regional y temperatura superficial del mar.

Con estos antecedentes, inicialmente se calcularon los valores de precipitación acumulada para una exploración de datos del periodo de interés, la cual correspondía a toda la serie de tiempo con una resolución temporal mensual. Esto es con la finalidad de poder visualizar patrones y estacionalidad, así como periodos en los que hubo un exceso de lluvias o una disminución de estas y, junto a una profundización del análisis mediante la revisión de históricos, tales como boletines u otras investigaciones, tener un preámbulo de por qué se comportó de dicha manera.

Finalmente, los valores de precipitación acumulada se utilizaron en el cálculo de estadísticos, así como en la elaboración de subproductos, para los cuales se utilizaron shapefiles correspondientes a cada región del país con la finalidad de que ciertas señales puedan acentuarse.

2.6.2. Funciones Ortogonales Empíricas

Las funciones ortogonales empíricas (EOF por sus siglas en inglés) es un método estadístico que analiza las componentes principales de un conjunto de datos para la determinación de su estructura respecto al tiempo, de esta forma es posible descomponer el comportamiento de las observaciones en un diagrama de fase y, en base al conocimiento adicional que se tiene de los datos, se explica por qué se han agrupado o estructurado de esa manera (Hannachi, Jolliffe, & Stephenson, 2007).

En este estudio se implementaron las EOF calculando los modos para toda la data en general, de modo que se explica la misma varianza de los datos, posteriormente se dividen los datos según los trimestres determinados (JJA, SON, DEF y MAM) y tomando las dos componentes principales mayores se los representa en un diagrama de fase para la observación de su estructura según el tiempo.

2.6.3. Índice Estandarizado de Precipitación

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés), es una herramienta estadística que cuantifica y estandariza las anomalías de precipitación (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), actualmente, el SPI es referenciado como el principal índice meteorológico respecto al monitoreo de déficit de precipitación (Hayes, Svoboda, Wall, & Wildhalm, 2011) por parte de la WMO. El SPI requiere de data histórica de precipitación para una región de interés, este puede trabajar con 20 años de datos, pero idealmente deberían ser al menos 30 para que los resultados puedan ser fiables (Guttman, 1999), considerando que la serie de tiempo con la que se trabajó tiene datos desde 1981 hasta la actualidad, este criterio se cumple, por lo que es un punto adicional que incidió en la elección de CHIRPS. La cuantificación que provee el SPI permite identificar sequías cuando se tienen valores inferiores a cero y humedad (en forma de lluvia u otros eventos), cuando es superior a cero (Integrated Drought Management Programme, 2023), sin embargo, (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) indica que los déficits empiezan en valores alrededor de -1, esto puede cambiar entre autores.

Sabiendo que los eventos El Niño tienen influencias en la precipitación durante su ocurrencia (Trenberth K. , 1997), la elección del SPI a tres meses (SPI 3) se basó en que los periodos de tres meses coinciden con las fases de desarrollo, apogeo y decaimiento de los eventos El Niño cuyo desempeño se pudo probar en el estudio de (Singh & Shukla, 2020), el SPI 3, comparado a otros índices, es relativamente más sencillo de utilizar, sin embargo, los productos obtenidos permiten tener una fuerte base o antesala a la implementación de otros índices que requieren de más variables o datos, tales como temperatura o altura, entre otros; he aquí su debilidad, dado que no acepta otras variables que ciertamente tendrán influencia como las anteriores mencionadas (Integrated Drought Management Programme, 2023), por lo que al querer comparar escenarios con valores similares de SPI, no es posible indicar que se debe a la presencia de un evento El Niño.

2.6.3.1. Cálculo

El cálculo del SPI se basa en el ajuste de los datos de precipitación a una distribución gamma (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), que parte de la siguiente ecuación:

$$g(x) = \frac{1x^{\alpha-1} * e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha} * \Gamma(\alpha)}$$

- a. Dado que se aplicó el SPI, inicialmente se calculó la precipitación acumulada en períodos de tres meses, considerando los dos meses anteriores al mes de observación, es decir, si se calculó el SPI 3 de mayo, este tomó en consideración los valores de precipitación de marzo, abril y mayo.
- b. Se estableció una climatología de 30 años, la cual corresponde a las 3 décadas anteriores (período 1981-2020), lo que proporcionó una medida para comparar los valores actuales con un histórico de mediciones, aunque en este trabajo, se la emplea de una manera diferente, aunque con el mismo fin.
- c. Se calcularon los parámetros alfa y beta, forma y escala respectivamente, los cuales controlan la forma que tendrá la distribución gamma, para este cálculo, solo se utilizan los datos que son parte de la climatología establecida anteriormente, dado que esta es la que moldea la distribución gamma. El cálculo de estos parámetros se realiza solo entre las observaciones correspondientes al mismo mes (Keyantash, 2023), es decir, se obtiene un alfa y beta mediante las observaciones solo correspondientes a enero, otro par para febrero y así, finalmente obteniendo los dos parámetros para cada mes.
- d. Empleando solo la climatología, se calculó la probabilidad de precipitación cero, debido a que CHIRPS tiene valores que no son cero, pero son extremadamente cercanos a este, se ajustó el cómputo para considerar valores menores a 1 mm de precipitación como ceros para el cálculo de la probabilidad de precipitación cero. De igual manera que el punto anterior, se calculó uno para cada mes.}
- e. Se realizó el cálculo de la probabilidad acumulada, para este se toma en consideración toda la serie de tiempo (1981-2024) empleando los parámetros calculados mediante la climatología, posteriormente se ajusta esta probabilidad acumulada incluyendo la precipitación cero, obteniendo una función gamma incompleta.
- f. Finalmente, la probabilidad acumulada se transforma a una distribución normal estándar, cuyos valores son el SPI 3 calculado.

Debido a la naturaleza de este estudio, se ha decidido implementar el SPI para tres meses, de modo que es posible analizar ciertos trimestres en los que el evento El Niño puede tener una

señal más fuerte, tal como diciembre-enero-febrero (DEF). Poder comparar este índice en una base trimestral con escalas de tiempo mayores, permite que sean mucho más visibles periodos de sequía o intensa precipitación (DNR, 2021).

2.6.3.2. Representación Gráfica

Posteriormente, se elaboraron productos escogiendo el SPI correspondiente a las fases críticas de El Niño (desarrollo, apogeo y decaimiento), lo que corresponde a los valores de SPI3 de agosto (JJA), noviembre (SON), febrero (DEF) y mayo (MAM). Se procedió con el ploteo de este por cada observación (evento) EL Niño y también se graficaron compuestos, los cuales promedian los valores de SPI3 por puntos de grilla agrupados según la misma intensidad de la tabla 2.4 Esto permitió identificar señales en las regiones del país y observar el comportamiento de las precipitaciones por estación y en base a la clasificación propuesta.

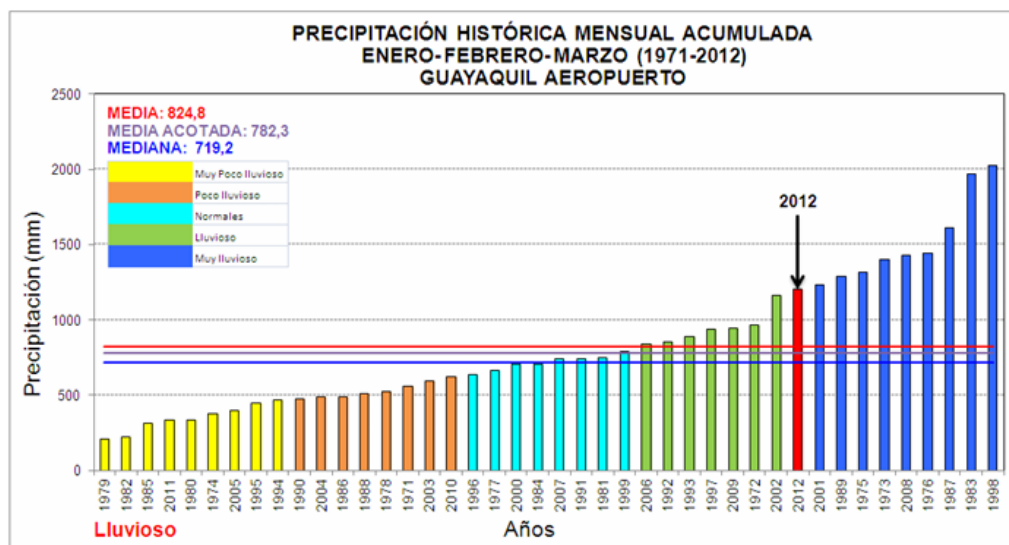
2.6.4 Quintiles

El análisis de quintiles se realizó netamente mediante el procesamiento de la data de precipitación acumulada, la cual es dividida en cinco partes iguales y cualificada de la siguiente manera:

- Primer Quintil: Seco: Condiciones relativamente más secas de todas las observaciones.
- Segundo Quintil: Poco lluvioso. Siguiendo quinta parte de los datos.
- Tercer Quintil: Condiciones Normales/Equilibradas.
- Cuarto Quintil: Lluvioso.
- Quinto Quintil: Muy lluvioso: Condiciones más húmedas de los datos, mayor precipitación.

Figura 9

Implementación de análisis de quintiles



Nota. Quintiles de precipitación histórica mensual acumulada para EFM (INAMHI, 2012).

Después de la cualificación, cada punto de grilla fue asignado a una de las cinco categorías, lo que permitió su representación gráfica y facilitó la identificación/comprobación de patrones. Estos patrones, analizados en conjunto con el SPI3, permitieron relacionar la información con estudios previos realizados por otros autores, lo que ayudó a discriminar posibles factores o variables que expliquen los valores obtenidos y el comportamiento específico de cada región. Además, se realizó un cálculo de los compuestos según la tabla 2.4, lo que permitió observar y analizar cómo varía cada punto de grilla a medida que se desarrolla el evento de El Niño.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

El diagrama de flujo de la metodología refleja que el procesamiento de los productos y su análisis individual no siguieron un orden lineal estricto. A lo largo del proceso, se hicieron ajustes en función de la retroalimentación recibida y la información recopilada, lo que llevó a modificaciones tanto en la estructura de los datos como en el código utilizado. Solo después de obtener los productos finales fue posible realizar un análisis integral, en el cual cada producto complementó y enriqueció los hallazgos de los otros.

3.1. Funciones ortogonales empíricas

Todos los datos de precipitación del país fueron usados para la aplicación de un EOF, se aplicaron distintas agrupaciones de datos, por ejemplo, agrupados según su región, sin embargo, a continuación, se presentan los modos obtenidos para toda la data en conjunto:

Tabla 6

Porcentaje de variabilidad explicada por los 7 primeros modos

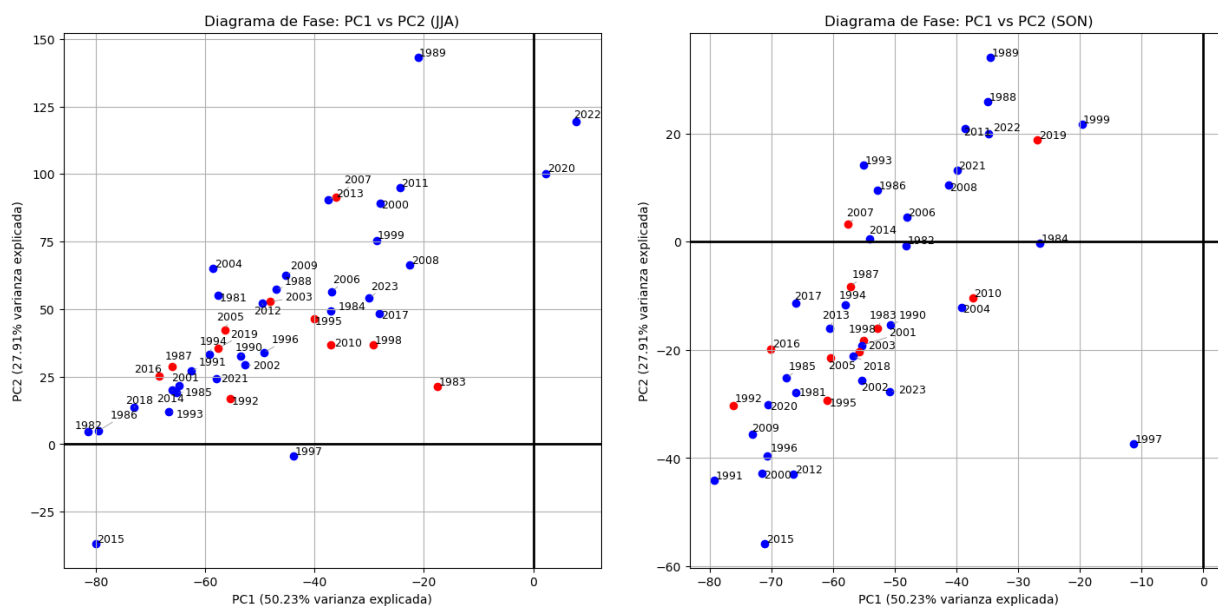
Varianza explicada por componente	
<i>Componente 1</i>	50.23%
<i>Componente 2</i>	27.91%
<i>Componente 3</i>	5.43%
<i>Componente 4</i>	3.00%
<i>Componente 5</i>	2.13%
<i>Componente 6</i>	1.62%
<i>Componente 7</i>	1.17%

Tomando en consideración los dos primeros modos, estos explican el 78.14% de la variabilidad de los datos, esto teniendo presente que solo se consideran los datos de precipitación mensual, posteriormente y en base a las mismas componentes principales, se realizó la relación entre las dos primeras componentes principales acorde a los cuatro trimestres.

Analizando los patrones espaciales, es posible obtener, para cada trimestre:

Figura 10

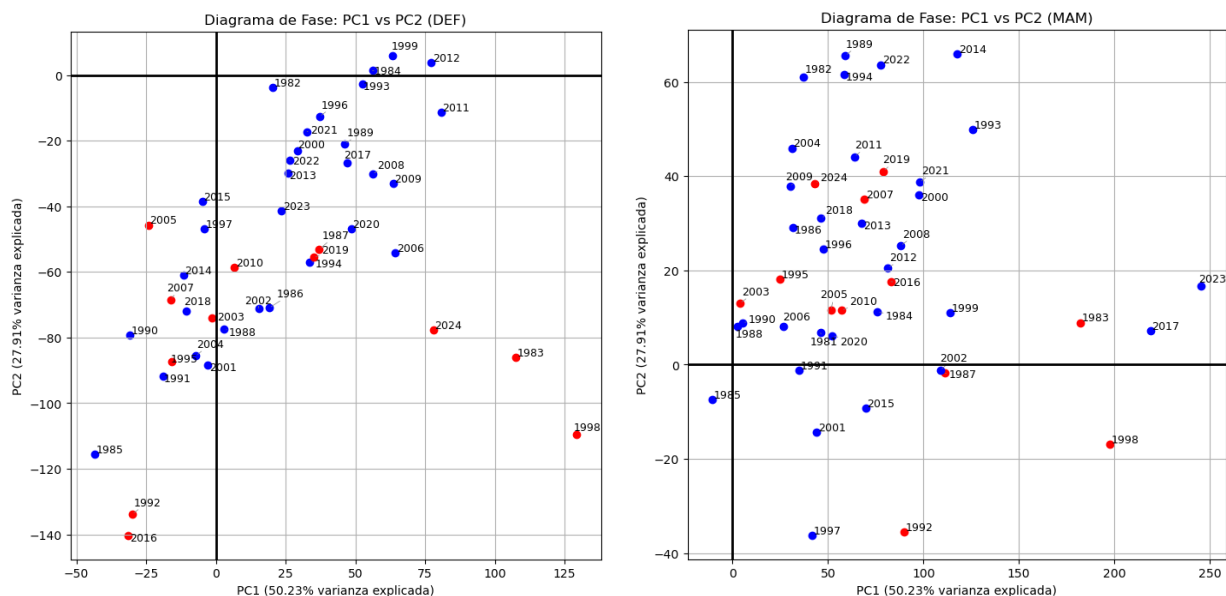
Diagramas de fase correspondientes a la estación seca



Para los trimestres de JJA y SON, si bien es posible ver cierta agrupación, la estructuración de los datos de precipitación no pareciera tener una diferenciación clara entre los años Niño, marcados en rojo) respecto a los años no-Niño. Es importante mencionar que en la exploratoria previa de las funciones ortogonales empíricas, aplicando subgrupos o dividiendo los datos por región, si bien es posible apreciar un comportamiento más marcado para algunas observaciones, como los años de 1982 y 1997 (años correspondientes a la época seca para los eventos El Niño), en general la proyección de los datos no indicaba un patrón o agrupación de datos que, al menos analizando solo la variable precipitación, se pueda afirmar de manera contundente.

Figura 11

Diagramas de fase correspondiente a la estación húmeda



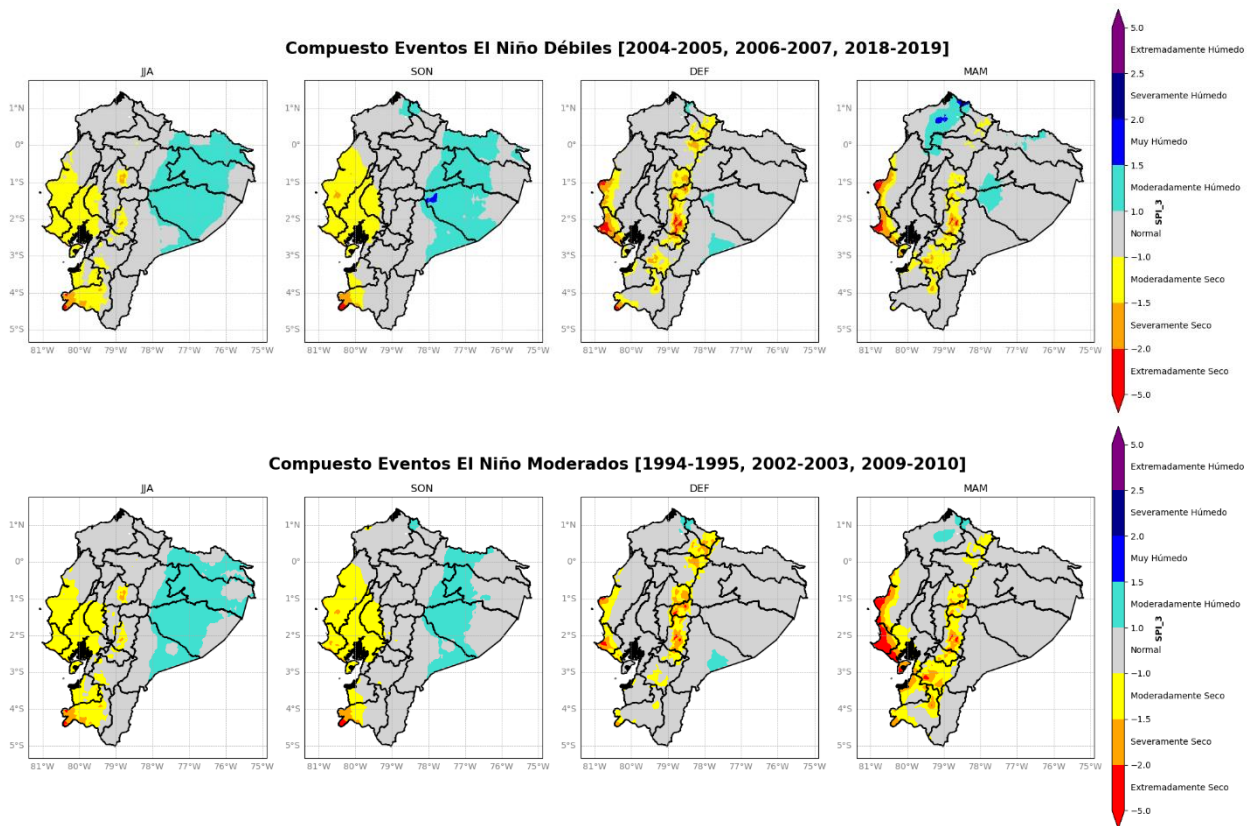
Para la estación húmeda, analizando los datos de manera global, la agrupación de las observaciones correspondientes a años Niño (denotadas en rojo) es más clara, en especial para el trimestre de diciembre-enero-febrero, tomando en cuenta que se considera como la época de apogeo de los eventos. Históricos como el Niño 24 se caracterizaron por tener una manifestación de precipitaciones mucho mayor para el primer trimestre de la época húmeda, mientras que para MAM su decaimiento fue relativamente rápido a comparación de eventos como el de 1983 o 1998, esto se puede apreciar en el diagrama de fase de MAM, así como algunas observaciones interesantes tales como la de 2023 que si bien fue un evento no-Niño, tuvo valores de precipitaciones por encima de lo normal en la mayoría de la Costa.

3.2. Índice Estandarizado de Precipitación

En los productos obtenidos del índice estandarizado de precipitación, se buscó observar e identificar señales según la clasificación propuesta, la obtención de los compuestos permitió hacer una comparación no solo entre los trimestres para un mismo tipo de eventos (análisis horizontal), más también una comparativa de un mismo periodo respecto a diferentes intensidades (análisis vertical).

Figura 12

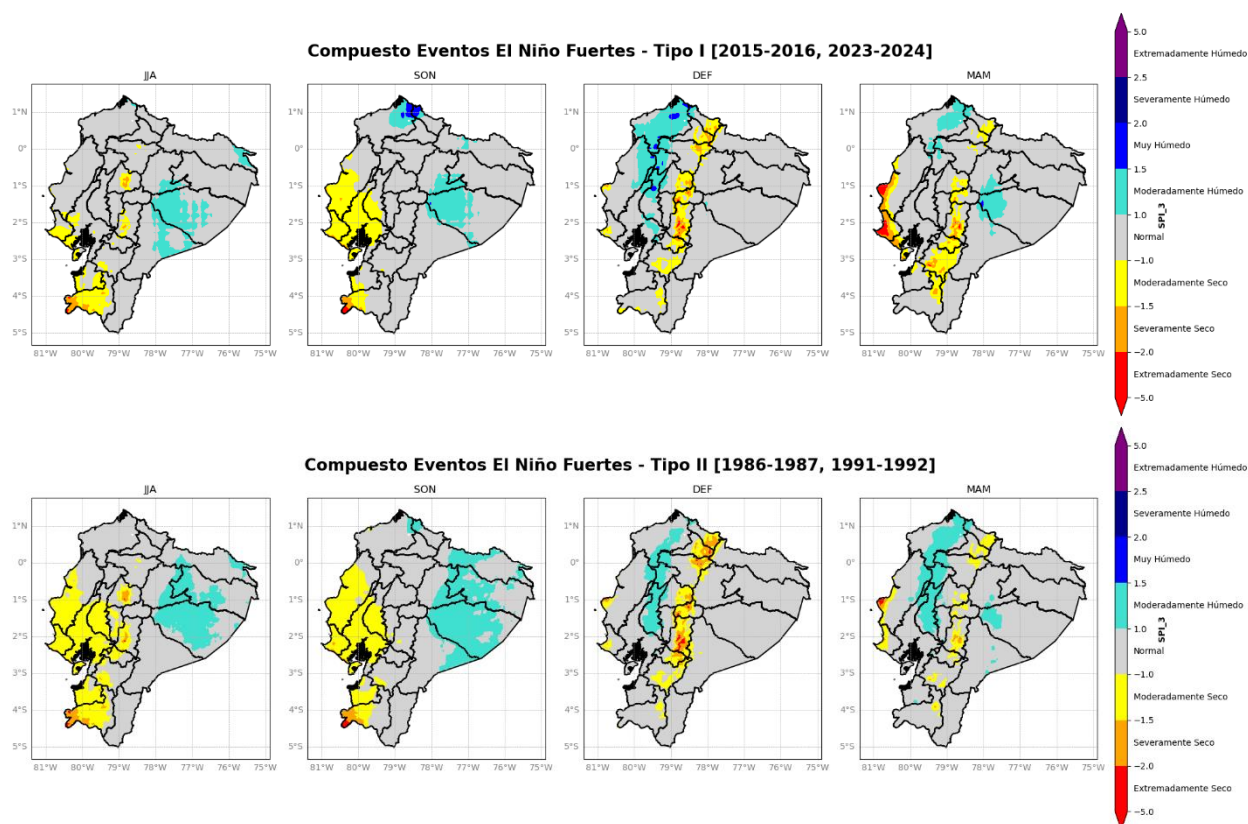
Compuesto de eventos El Niño débiles y moderados



Para los eventos débiles y moderados, no se tuvo una señal clara que indique pluviosidades mayores a lo normal; de hecho, se observaron áreas de la costa que incluso tienen condiciones más secas a pesar de la llegada de la época húmeda (trimestres de DEF y MAM), en la región interandina las condiciones suelen mantenerse normales o pasaron a ser más secas en el invierno respecto al verano.

Figura 13

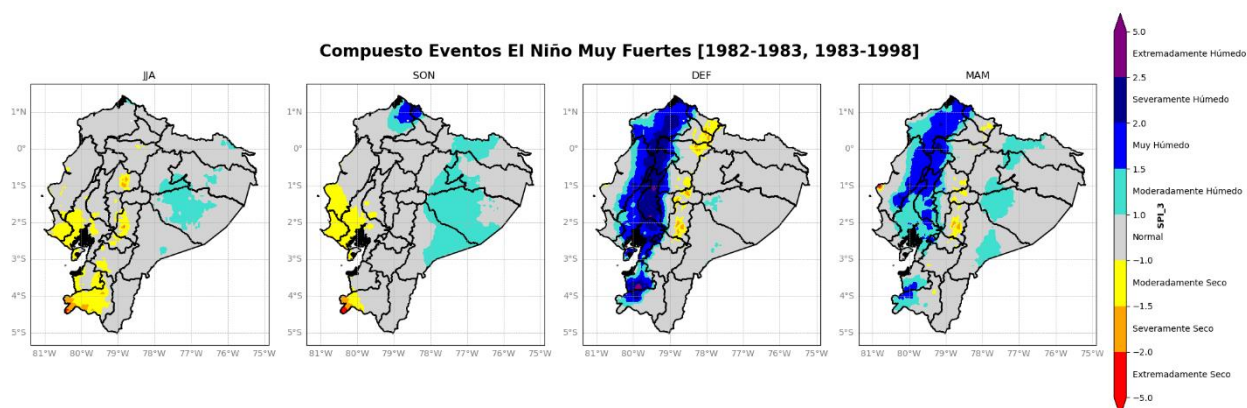
Compuesto de eventos El Niño fuertes tipo I y II



Para los eventos fuertes tipo I y II se pudo presenciar un aumento de las condiciones húmedas, en el norte y centro de la Costa. Cuando se analizó la precipitación acumulada, los valores son más altos para algunas regiones del litoral ecuatoriano, razón por la cual, en vez de pertenecer al rango de condiciones secas como sucedió en los eventos débiles, pasaron a ser normales. Los eventos tipo II se caracterizaron por una prolongación de condiciones relativamente más húmedas respecto a los del tipo I, esto a pesar de que, según el índice ONI, tuvieron anomalías de TSM inferior.

Figura 14

Compuesto de eventos El Niño muy fuertes



Para los eventos El Niño muy fuertes se constató una clara señal en la Costa, con condiciones severamente húmedas para la época invernal. En la región interandina, aunque no siempre se registra un aumento significativo en las precipitaciones, sí se evidenció una reducción de las condiciones secas durante la época húmeda.

En términos generales, en la Costa se observó un incremento en las precipitaciones en dirección oeste-este hasta la estribación occidental de la región Andina, junto con un aumento de las precipitaciones a medida que se intensifica el evento El Niño. Este patrón también se manifestó en la región interandina, aunque de forma más tenue, registrándose un incremento en las precipitaciones conforme aumentaba la intensidad del fenómeno. En la región amazónica, sin embargo, no se detectó una señal clara en el cálculo de los compuestos, lo que se atribuye a la barrera geográfica natural que representa la Cordillera de los Andes. Estos resultados son consistentes con las zonas de influencia descritas por Rossel en 1997, donde se señala que la Costa es una zona de influencia directa de El Niño, la estribación occidental de los Andes está parcialmente influenciada, y la Amazonía es una zona de influencia nula, debido a la barrera andina.

3.3. Análisis de quintiles de precipitación

3.3.1. Región Costa

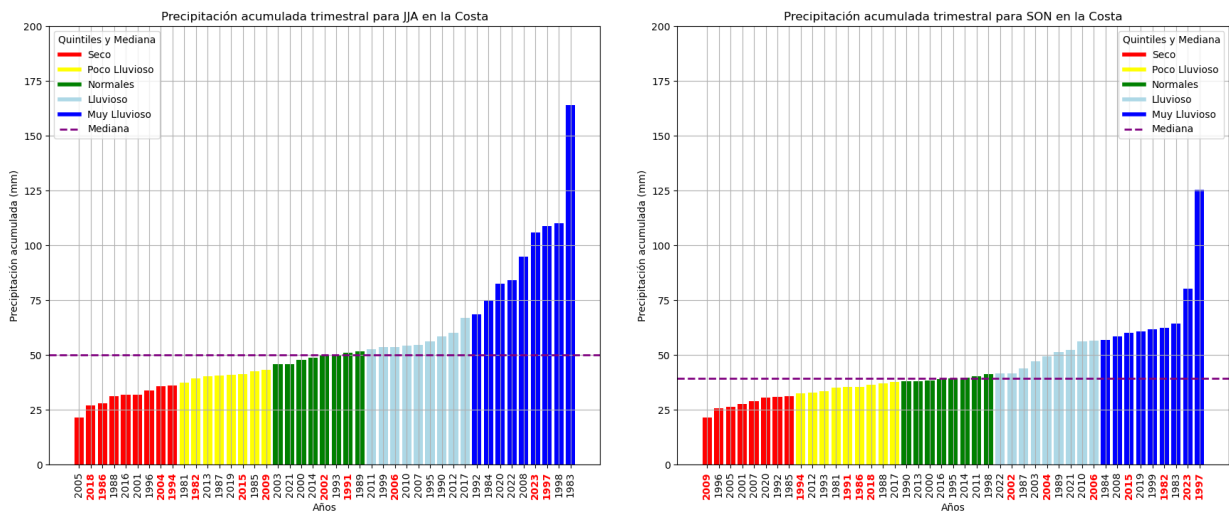
Tabla 7

Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano en la Costa

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	JJA	SON
Seco:	21.34 mm - 36.08 mm	21.46 mm - 31.38 mm
Poco Lluvioso	37.51 mm - 43.12 mm	32.68 mm - 37.89 mm
Normales	45.98 mm - 51.81 mm	38.04 mm - 41.38 mm
Lluvioso	52.65 mm - 67.01 mm	41.50 mm - 56.44 mm
Muy Lluvioso	68.43 mm - 164.03 mm	57.02 mm - 125.24 mm

Figura 15

Quintiles de precipitación, estación de verano en la Costa



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

En el trimestre JJA, las precipitaciones oscilaron entre 21.34 mm y 164.03 mm, mientras que en el trimestre SON el rango varió desde 21.46 mm hasta 125.24 mm. Los años asociados a eventos El Niño no se ubicaron necesariamente en los quintiles superiores, especialmente durante el primer trimestre de este par. Este patrón también se observó en el análisis previo del SPI3, donde se registraron condiciones de baja precipitación.

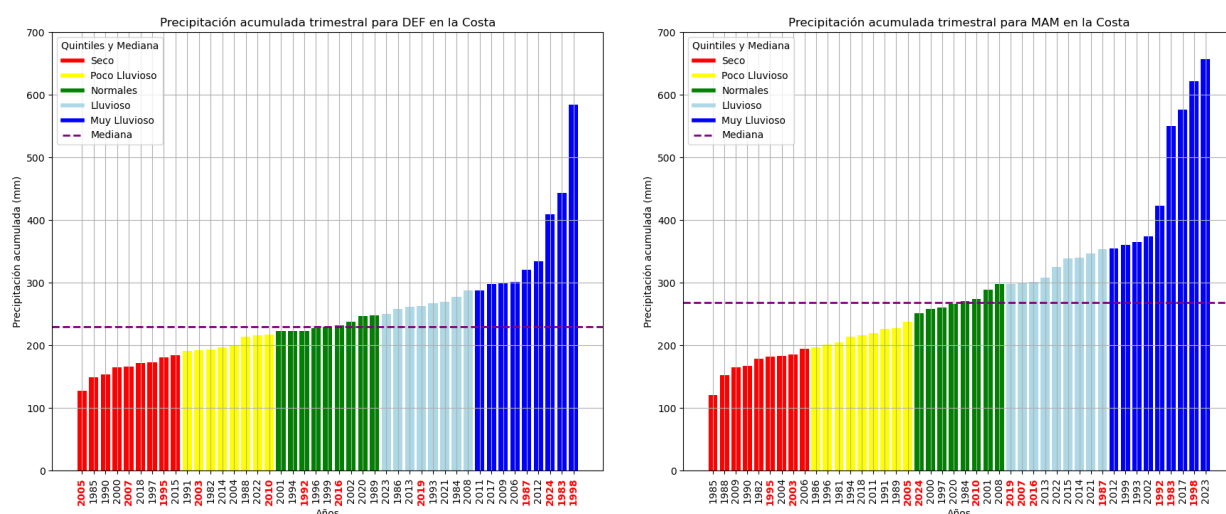
Tabla 8

Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Costa

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	DEF	MAM
Seco	127.54 mm - 184.29 mm	120.34 mm - 194.36 mm
Poco Lluvioso	190.90 mm - 216.75 mm	196.92 mm - 237.86 mm
Normales	222.44 mm - 248.08 mm	251.17 mm - 297.56 mm
Lluvioso	250.35 mm - 287.49 mm	298.09 mm - 354.15 mm
Muy Lluvioso	287.70 mm - 584.16 mm	355.10 mm - 657.54 mm

Figura 16

Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Costa



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

Para la época invernal en la región Costa, se tuvo un rango de precipitaciones de 127.54 mm hasta 584.16 mm para DEF, mientras que para MAM fue de 120.34 mm hasta 657.54 mm, se apreció como los eventos El Niño tienden a ocupar los quintiles más altos respecto a la época seca, sin embargo, hay observaciones que se encuentran en los quintiles más bajos, donde hecho, el evento El Niño 2005 en DEF es el de menor precipitación de todos.

3.3.2. *Región Sierra*

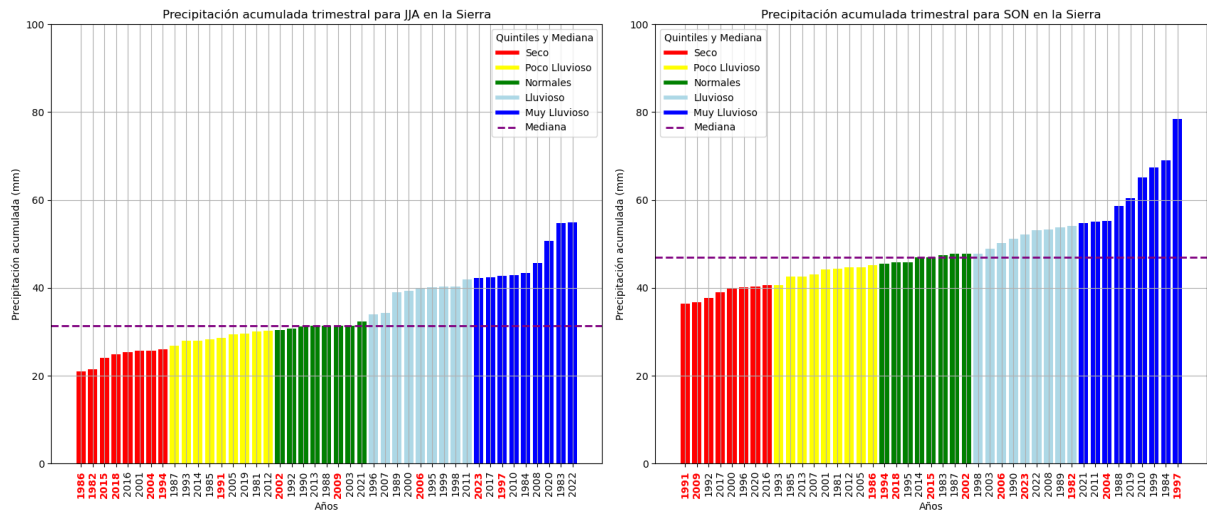
Tabla 9

Rangos de precipitación por quintil la estación de verano en la Sierra

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	JJA	SON
Seco	20.99 mm – 26.03 mm	36.34 mm – 40.58 mm
Poco Lluvioso	26.87 mm – 30.16 mm	40.66 mm – 45.19 mm
Normales	30.47 mm – 32.29 mm	45.53 mm – 47.78 mm
Lluvioso	34.01 mm – 41.97 mm	47.81 mm – 54.16 mm
Muy Lluvioso	42.30 mm – 54.87 mm	54.77 mm – 78.49 mm

Figura 17

Quintiles de precipitación, estación de verano en la Sierra



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

Durante la época seca, se obtuvo un rango de precipitaciones de 19.18 mm a 54.87 mm para JJA y de 36.34 mm a 78.49 mm en el trimestre de SON, los años Niño no necesariamente se ubican en los quintiles mayores de precipitación, aunque el evento de 1997-1998 siempre se mantiene entre los más lluviosos, como podremos ver posteriormente. Adicionalmente, para JJA el quintil más bajo está compuesto casi en su totalidad por años Niño, si bien cabe mencionar que este periodo corresponde a la primera fase de desarrollo de dicho evento.

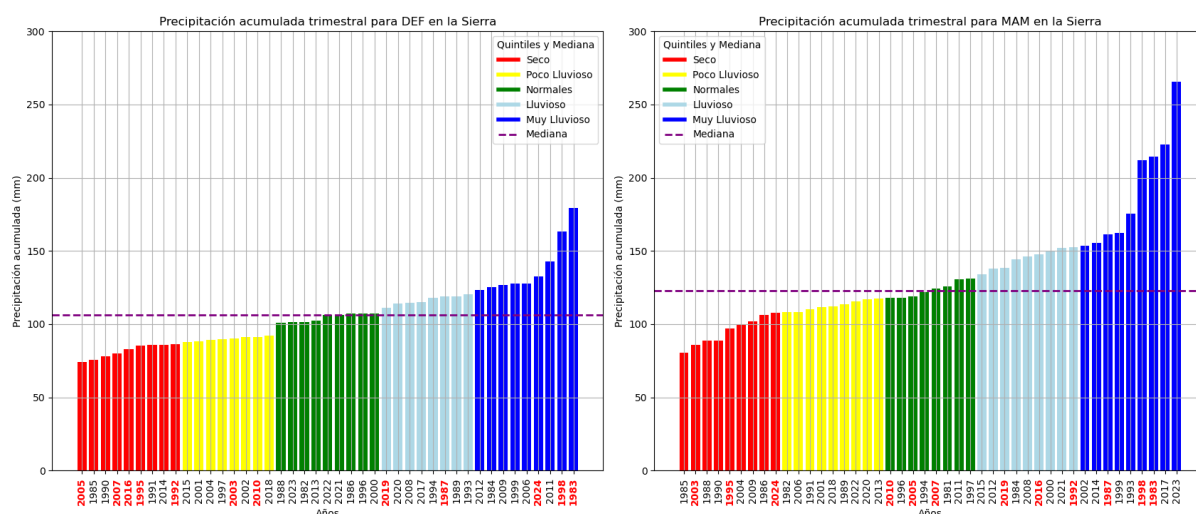
Tabla 10

Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Sierra

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	DEF	MAM
Seco	74.08 mm – 86.24 mm	80.65 mm – 107.92 mm
Poco Lluvioso	87.55 mm – 91.97 mm	107.99 mm – 117.27 mm
Normales	101.15 mm – 107.44 mm	117.90 mm – 131.22 mm
Lluvioso	111.03 mm – 120.30 mm	134.08 mm – 152.41 mm
Muy Lluvioso	123.12 mm – 179.28 mm	153.67 mm – 265.66 mm

Figura 18

Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Sierra



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

Con un rango de precipitación general entre 74.08 mm hasta 179.28 mm para el trimestre DEF y 80.65 mm hasta 265,66 mm para MAM, hay un aumento relativamente considerable en el volumen de precipitación. Los años Niño de mayor intensidad (muy fuertes, fuertes tipo I y II) tienden a encontrarse en los quintiles de mayor precipitación, sumándose el evento de 2019. El año Niño del 2005 en el trimestre de DEF nuevamente es el año de menor precipitación para nuestra serie de tiempo.

3.3.3. Región Amazonía

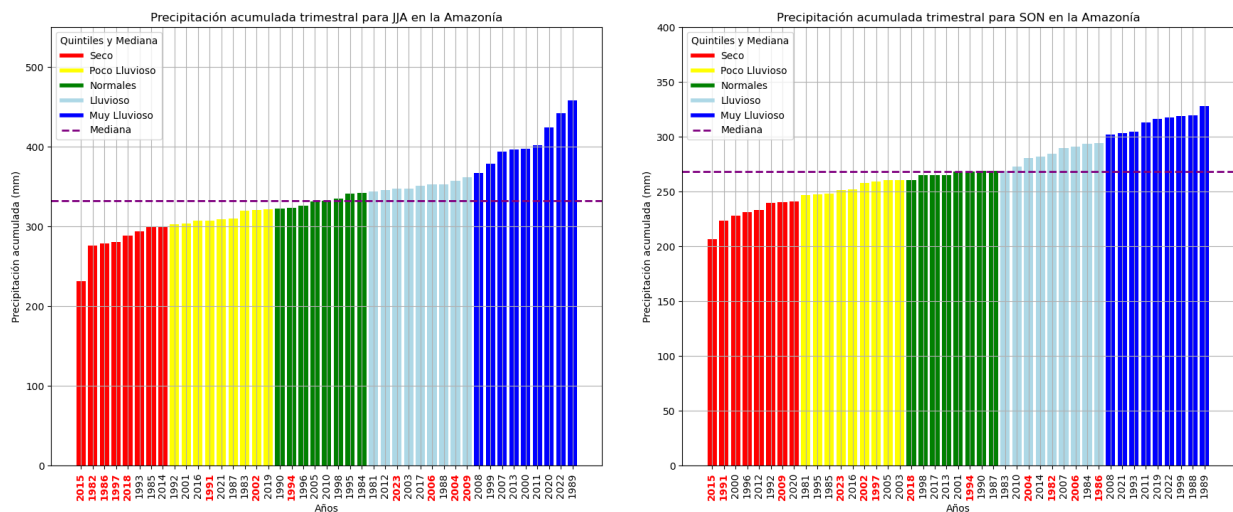
Tabla 11

Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano en la Amazonía

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	JJA	SON
Seco	231.33 mm – 299.89 mm	206.74 mm – 241.34 mm
Poco Lluvioso	303.32 mm – 321.96 mm	247.06 mm – 260.59 mm
Normales	322.43 mm – 342.25 mm	260.70 mm – 269.13 mm
Lluvioso	344.15 mm – 362.18 mm	269.29 mm – 294.03 mm
Muy Lluvioso	367.29 mm – 458.41 mm	302.04 mm – 327.93 mm

Figura 19

Quintiles de precipitación, estación de verano en la Amazonía



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

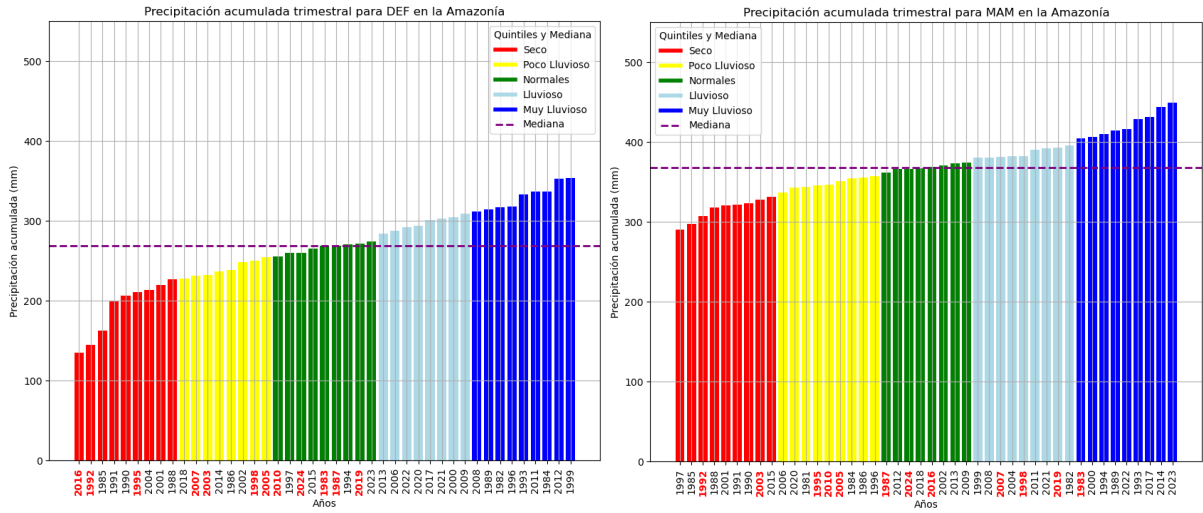
Tabla 12

Rangos de precipitación por quintil para la estación invernal en la Amazonía

Rangos de precipitación por quintil:		
Clasificación	DEF	MAM
Seco	135.01 mm – 226.95 mm	289.96 mm – 331.03 mm
Poco Lluvioso	228.21 mm – 254.29 mm	336.79 mm – 357.33 mm

Normales	255.79 mm – 274.56 mm	361.89 mm – 374.20 mm
Lluvioso	284.03 mm – 309.52 mm	380.36 mm – 395.64 mm
Muy Lluvioso	311.41 mm – 353.40 mm	404.55 mm – 449.28 mm

Figura 20
Quintiles de precipitación, estación de invierno en la Amazonía



Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

Al analizar todos los periodos en conjunto para la Amazonía, no se observó una tendencia definida que ubicara los años Niño en un quintil específico, lo que reafirmó la falta de influencia de estos eventos en la región. Además, al examinar los rangos de precipitación por quintil en cada trimestre, se evidenció que no hubo una tendencia de incremento en la pluviosidad al pasar de la época seca a la húmeda, sugiriendo que otros factores climáticos y geográficos, como la barrera de los Andes, podrían desempeñar un papel más determinante en el comportamiento de las precipitaciones en la Amazonía.

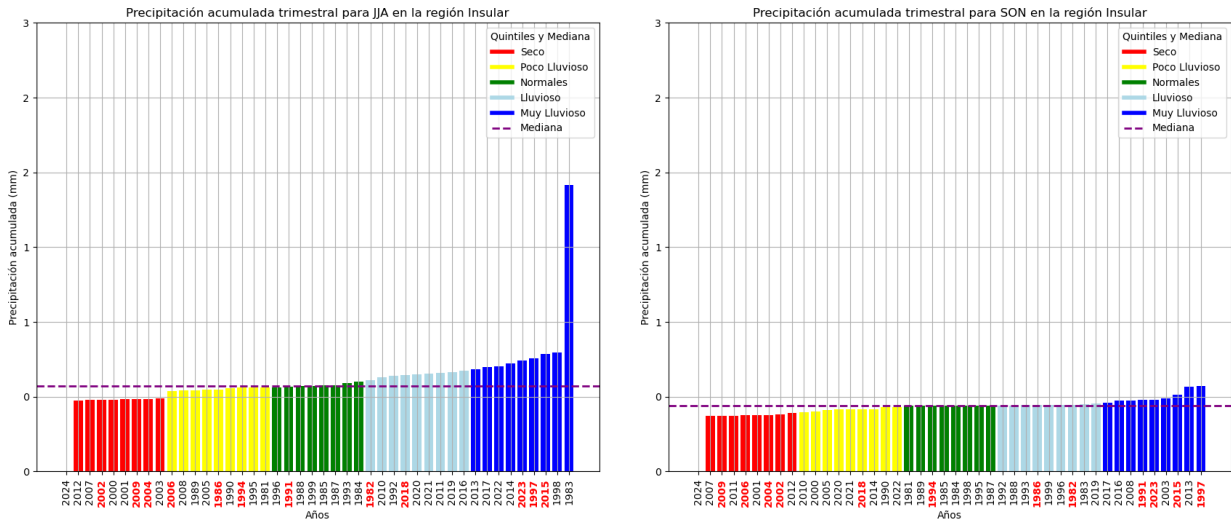
3.3.4. Región Insular

Tabla 13
Rangos de precipitación por quintil para la estación de verano, Insular

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	JJA	SON
Seco	0.00 mm - 0.49 mm	0.00 mm - 0.39 mm

Poco Lluvioso	0.54 mm - 0.56 mm	0.40 mm - 0.43 mm
Normales	0.56 mm - 0.60 mm	0.44 mm - 0.44 mm
Lluvioso	0.61 mm - 0.67 mm	0.44 mm - 0.45 mm
Muy Lluvioso	0.68 mm - 1.91 mm	0.46 mm - 0.57 mm

Figura 21
Quintiles de precipitación, estación de verano, región Insular



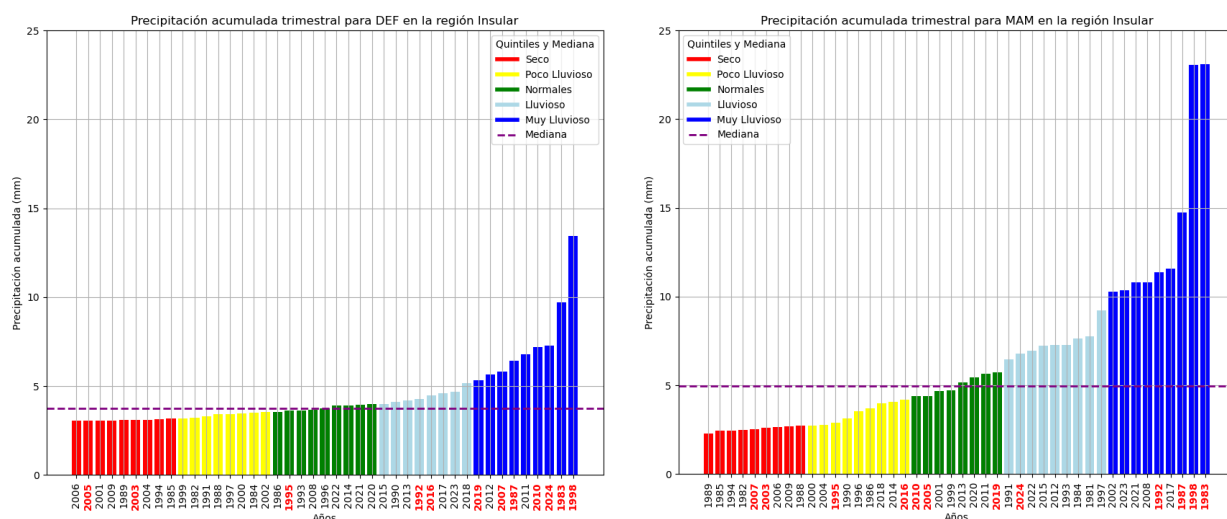
Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

Tabla 14
Rangos de precipitación por quintil la estación invernal, Insular

Rangos de precipitación por quintil:		
Categoría	DEF	MAM
Seco	3.03 mm - 3.16 mm	2.29 mm - 2.71 mm
Poco Lluvioso	3.17 mm - 3.55 mm	2.72 mm - 4.19 mm
Normales	3.55 mm - 3.98 mm	4.38 mm - 5.74 mm
Lluvioso	3.99 mm - 5.18 mm	6.45 mm - 9.22 mm
Muy Lluvioso	5.32 mm - 13.43 mm	10.29 mm - 23.10 mm

Figura 22

Quintiles de precipitación, estación de invierno, región Insular



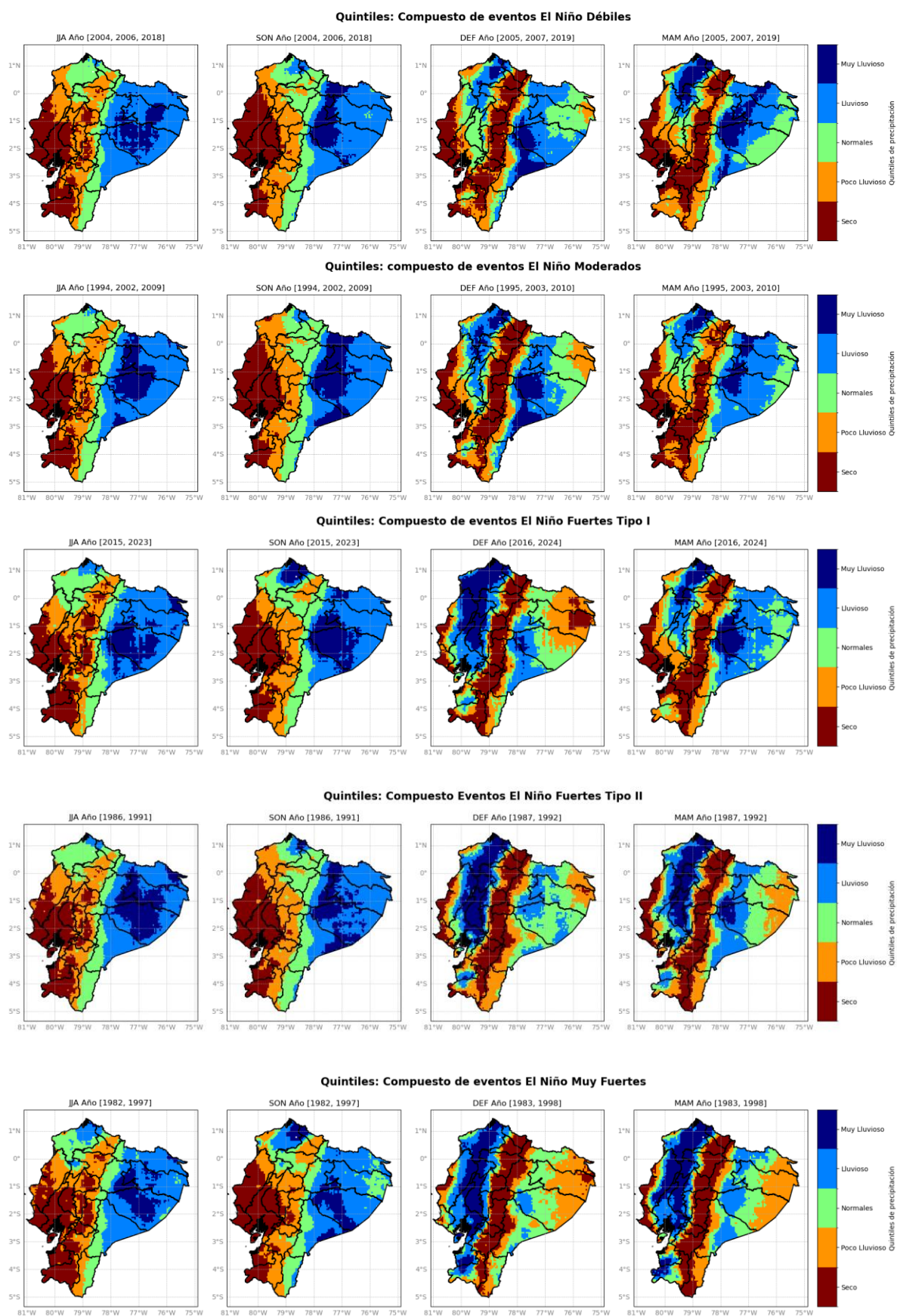
Nota. Para su diferenciación, años Niño en rojo y años no-Niño en negro.

En la región Insular, los valores de precipitación fueron significativamente menores en comparación con Ecuador continental, tanto en la estación seca (ver tabla 3.11) como en la húmeda (ver tabla 3.12). Aunque durante la temporada lluviosa se observó un patrón similar al de los años Niño en la Costa, con estos ubicándose en los quintiles superiores, es necesario realizar un análisis más detallado para confirmar esta tendencia de manera concluyente. Esto se debe a que, a pesar de la menor extensión territorial, se registraron variaciones de precipitación considerablemente grandes entre puntos cercanos, lo que se explica por la mayor concentración de lluvias en zonas de mayor altitud en comparación con las áreas bajas esto por factores como los vientos y la configuración del terreno que finalmente contribuyen a la formación de diversos microclimas en esta región.

3.3.5. Análisis espacial de quintiles para Ecuador Continental

Figura 23

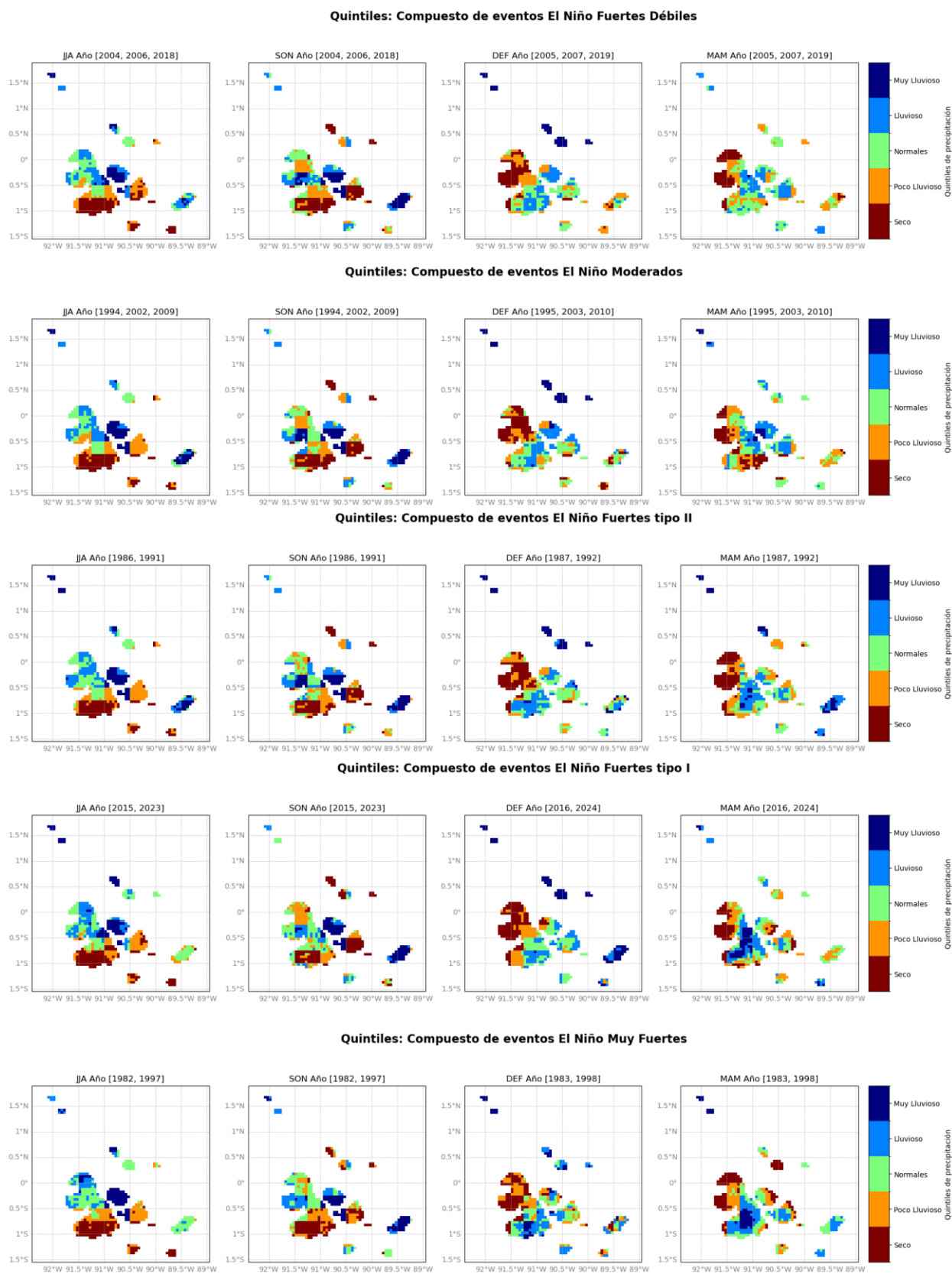
Matriz de compuestos de quintiles según clasificación propuesta en continente



3.3.6. Análisis espacial de quintiles para la región Insular

Figura 24

Matriz de compuestos de quintiles, clasificación propuesta en el archipiélago



En el análisis espacial que se realizó para entender cómo se distribuyen estos quintiles en el territorio ecuatoriano de continente (figura 3.12), según la clasificación establecida en la tabla 2.4 de la metodología, se observó un patrón claro en la Costa. A medida que se pasa de eventos débiles a muy fuertes y se transita de la época seca a la húmeda, la región tiende a ubicarse en los quintiles de ‘Muy Lluvioso’ o ‘Lluvioso’. En la región interandina, se destaca el predominio del quintil ‘Seco’ a lo largo de su extensión. Por otro lado, en la región amazónica, no se identificó un patrón que permita hacer inferencias claras o afirmaciones concretas sobre la distribución de los quintiles.

En el análisis espacial de quintiles en la región Insular (figura 3.13), no se identificó una señal clara que destaque alguna subregión en particular. Sin embargo, se observó que algunas zonas elevadas, especialmente durante la estación húmeda, tienden a ubicarse en los quintiles superiores, como es el caso del volcán Sierra Negra en la isla Isabela. A pesar de ello, los datos de CHIRPS parecen no estar completamente calibrados para esta región, lo que, sumado a la complejidad de los sistemas climáticos que influyen en las Islas Galápagos, subraya la necesidad de un análisis mucho más detallado y específico. Es crucial incorporar datos provenientes de estaciones in situ para validar las observaciones, al menos en ciertas áreas del archipiélago, lo que permitirá una interpretación más precisa y fiable de los patrones de precipitación.

3.4. Análisis de costos

A continuación, se detallan los costos de implementación del proyecto. Dado que se tiene un manejo de datos masivos, es importante tener un computador con una capacidad de procesamiento computacional alta, de modo que es posible ser más eficiente al disminuir los tiempos de corrida en el entorno Jupyter. El empleo de ArcGis facilita la manipulación de archivos vectoriales como los '.shp' previo a su implementación en Python. La base de datos de CHIRPS es de libre acceso, por lo que no representa un costo.

Según lo mostrado en las tablas 3.10 y 3.11, se tendría un total de \$6285.00, lo que cubriría el costo del proyecto de investigación.

Tabla 15

Detalle de recursos humanos participantes del proyecto

Equipo y herramientas	Cantidad	Honorarios por mes	Total de honorarios
Ingeniero Oceanográfico	1	\$1050	\$4200

Tabla 16

Detalle de implementaciones/herramientas utilizadas en el proyecto

Equipo y Herramientas	Cantidad	Precio Unitario	Costo	Observación
Computador:				
Ryzen 9, 24Gb RAM, RX5600, SSD de 1 Tb. GPU: 6800S ≡ RX3700	1	\$1700.00	\$1700.00	
Jupyter Notebook	1	\$0.00	\$0.00	Software de libre acceso
ArcGis Pro	1	\$385.00	\$385.00	Suscripción anual
Datos de CHIRPS 2.0 (Por descarga de archivo .nc)	1	\$0.00	\$0.00	Datos de libre acceso
TOTAL	-	-	\$2085.00	-

En base a la metodología y resultados obtenidos en este proyecto, existen algunas implementaciones a considerar en un plazo mediano, las cuales aportarían información valiosa y permitirían profundizar los análisis obtenidos:

- Automatización de los productos, los cuales conforme a CHIRPS, o alguna base de datos adicional considerada, obtenga los datos del siguiente periodo, sea este diario, mensual o anual según la resolución temporal deseada, se procesen y carguen a algún repositorio o página web en conjunto a su análisis respectivo.
- La implementación de otras variables tales como temperatura y vientos, así como índices como el SPEI (Evapotranspiración) en alguna consultoría o análisis de estudio específico para alguna locación en específico, como algún cantón o provincia del país.

Considerando la primera opción, considerando el primer año y en dólares americanos (USD):

Tabla 17

Automatización de productos/servicios en la web

Ítem	Cantidad	Precio Unitario	Costo	Observación
Proveedor de Nube: AMS (Amazon Web Services)	1	\$100.00/año	\$100.00	Servicio 24 horas, 7 días.
Almacenamiento	1	\$0.10/GB/Mes	\$24/año	Asumiendo el uso de 20 Gigas base entre código, datos y productos.
Desarrollo <i>Front-end</i>	1	\$400.00	\$400.00	Desarrollo de diseño visual.
Desarrollo <i>Back-end</i>	1	\$1300.00	\$1300.00	Gestión de datos, lógica del servidor y cálculos.
Responsivo del desarrollo web	1	\$300.00	\$300.00	En caso de necesitar adaptaciones/expansiones conforme se demande.
Visualización de productos	1	\$400.00/año	\$400.00	Integración de productos SPI, SPEI, Análisis de Vientos/Temperatura u otras regiones de interés.
Alojamiento y dominio web	1	\$120.00/año	\$100.00	Dominio web y certificación de seguridad (SSL) preferiblemente pagos para mayores

				garantías de seguridad/mantenimiento.
TOTAL	-	-	\$2624.00	-

Posterior al primer año, es vital el mantenimiento del hardware y software (base de datos, código, bugs, entre otros), suscripción a los servicios de hosting (almacenamiento) e implementaciones, por lo que:

Tabla 18

Mantenimiento de la automatización posterior al primer año

Ítem	Cantidad	Precio Unitario	Costo	Observación
Mantenimiento	1	\$500.00/Año *	\$500.00	Control de bugs, actualización de lógica del servidor, entre otros.
Hosteo de servicios	1	\$224.00/año	\$224.00	Proveedor de Nube, almacenamiento, alojamiento y dominio web.
Visualización de productos	1	\$400.00/año	\$400.00	Visualización de productos tales como SPI, SPDI, análisis, entre otros.
Implementaciones o responsivos necesarios	1	\$500.00/año*	\$500.00	Implementación de productos adicionales, APIs, desarrollo base de apps, entre otros.
TOTAL	-	-	\$1624.00	-

* Precio se establece acorde a un tráfico leve, este puede aumentar en el caso de que exista un mayor acceso/descarga de los productos.

Para la implementación de la automatización, se tendría un total de \$4248.00 para los dos primeros años, sin embargo, hay que considerar que algunos ítems de la tabla 17 solo requieren de un pago, como el desarrollo web en general; aquellos de la tabla 18 son anuales, si bien estos pueden aumentar considerando actualizaciones relevantes, implementaciones o que tan concurrido puede ser el acceso a estos productos en el portal destinado.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Las herramientas y metodologías implementadas en este trabajo demostraron ser efectivas para la categorización de las precipitaciones durante eventos El Niño, en línea con enfoques similares empleados en otros estudios de precipitación asociados a estos fenómenos.

El análisis de la estructura de los datos, aunque se centró únicamente en la precipitación, mostró coherencia con los eventos históricos analizados, destacándose especialmente los eventos extremos de 1982-1983 y 1997-1998, que en los análisis EOF y espaciales demostraron una cohesión relativa entre sí.

La variabilidad regional de los eventos El Niño mantuvo una concordancia con la regionalización implementada, basada en el trabajo de Rossel en 1998, que en base a las zonas de influencia se tuvo:

- En la región Costa, se observa una tendencia al aumento de la precipitación desde el límite Océano Pacífico hasta el borde occidental de la región Andina, es necesario añadir que los eventos débiles y moderados, respecto a los de mayor intensidad, muestran una señal de déficit en las precipitaciones durante los trimestres DEF y MAM para el SPI-3.
- Los patrones y características del litoral ecuatoriano sugieren que los eventos fuertes tipo I presentan una estructuración diferente a los de tipo II, esto a pesar de que ambos tienen anomalías similares de temperatura superficial del mar en la región 3.4. Esto también es posible de afirmar gracias a los impactos manifestados en territorio ecuatoriano, en especial en el sentido económico y de personas afectadas.

- En las regiones sur-orientales de los Andes, las condiciones tienden a mantenerse relativamente secas durante los trimestres de DEF y MAM, en especial durante aquellos eventos El Niño que no son muy fuertes.
- La región Oriental carece de un patrón definido esto se debe a la barrera geográfica que es la Cordillera de los Andes. El Niño incide de manera nula o muy baja en las precipitaciones de esa región.

CHIRPS evidenció tener buenos resultados en Ecuador continental, lo que también sucede en otros estudios, sin embargo, para la región Insular requiere de una metodología y análisis más exhaustivo, esto se puede deber a factores como:

- La escasez de estaciones meteorológicas in situ para la comparación, calibración y validación de las observaciones de precipitación.
- La complejidad topográfica de la región, colmada de diversos microclimas con variados terrenos en un área tan pequeña.
- Las condiciones climáticas únicas de la región, como la influencia de corrientes oceánicas.

Considerando los resultados finales que se obtuvieron para Ecuador continental analizando solo la precipitación, se podrían implementar, manteniendo la misma base metodológica, otros índices derivados del SPI3 como el SPDI (*Standardized Pluviometric Drought Index*) o SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) que tienen un procesamiento diferente o toman en consideración otras variables como el potencial de evaporación, pero buscan reflejar lo mismo.

4.2. Recomendaciones

Se debe considerar la aplicación de la misma metodología, pero a diferentes sets de datos para comparar las posibles variaciones que se puedan tener al obtener los productos finales.

Se podría aplicar una regionalización que sea referente a las zonas climáticas del país de modo que al agrupar los datos según estas podrían identificarse señales y estructuras más definidas.

La aplicación de esta metodología a una provincia o parroquia podría permitir conocer detalladamente las condiciones de dicha área geográfica, de modo que se podría desarrollar un producto o proyecto adicional tal como un mapa de inundaciones, deslaves, zonas de riesgos, implementación de un SAT, entre otros.

Un enfoque integral para el análisis de una región, que también considere variables como la temperatura, la humedad relativa, la altitud y los vientos, junto con la evaluación de eventos importantes como el Anticiclón del Pacífico Sur y la aplicación de métodos estadísticos adicionales, permitiría obtener resultados más sólidos y concluyentes.

5. Bibliografía

- Banco Mundial. (2016). *Fenómeno de El Niño 2016 - Ecuador: Evolución e impactos*.
- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadí, A., Poulain, F., & Harrod, C. (2020). *El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture*. Rome: AO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 660. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>.
- CAF. (2000). *Corporación Andina de Fomento. Las lecciones de El Niño: Memorias del Fenómeno El Niño 1997-1998 en Ecuador. Retos y propuestas para la región Andina*. Ecuador: CAF: VOL IV. Recuperado de: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/675>.
- Cedeño Oviedo, J. (2008). *Validación de tres productos de precipitación en la costa ecuatoriana*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar.
- CEPAL. (1998). *Comisión Económica para América Latina y El Caribe: Evaluación de los efectos socioeconómicos del fenómeno El Niño*. Ecuador: PNUD-CAF. Disponible a través de: <https://hdl.handle.net/11362/31104>.
- CIIFEN. (2022). *El Niño Oscilación del Sur*. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño. Conceptos de meteorología y clima.
- Constantino Blain, G. (2011). *Standardized precipitation index based on Pearson type III distribution*. Rev. bras. meteorol. 26 (2) • June 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200001>.
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). *Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa..* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144(S1), 292-312. DOI: 10.1002/qj.3244.
- DNR. (2021). *Indiana Department of Natural Resources. Explanation of Standard Precipitation Index (SPI)*. Water Resources Updates.
- ENFEN. (2012). *Estudio Nacional del Fenómeno El Niño: Definición operacional de los eventos El Niño y la Niña y sus magnitudes en la costa del Perú*. Nota Técnica. <http://www.infocoders.com/projects/ENFEN/download/icen-nota-tecnica-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-y-la-nina-y-sus-magnitudes-en-la-costa-del-peru>.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., & et al. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. Sci Data 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

- Gibson, L. J. (2016). *Biogeografía y las Islas Galápagos*. Geoscience Research Institute. Ciencia de los Orígenes. Número 89.
- Golden Gate Weather Services. (2024). *El Niño and La Niña Years and Intensities*.
- González, O. C., & Casallas, I. (2014). *Hoja metodológica del indicador Anomalía de precipitación (Versión 1.10). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Servicio de Información Ambiental*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 9 p.
- Guttman, N. (1999). *Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm*. . Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 311-322. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- Hannachi, A., Jolliffe, I., & Stephenson, D. (2007). *Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review*. International Journal of Climatology, 1119-1152. doi:doi:10.1002/joc.1499.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Wildhalm, M. (2011). *The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended*. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(4): 485–488. DOI: 10.1175/2010BAMS3103.1.
- IFRC. (2023). *Ecuador: Floods related to the El Niño phenomenon - Early Action Protocol Activation*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. Extraído de: <https://reliefweb.int/report/ecuador/ecuador-floods-related-el-nino-phenomenon-early-action-protocol-activation-eap2020ec02-operation-no-mdrec023-23-august-2023>.
- INAMHI. (2012). *Informe especial de precipitaciones durante el trimestre enero-marzo del 2012 en el litoral ecuatoriano*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Proceso Desconcentrado Cuenca Río Guayas.
- Integrated Drought Management Programme. (2023). *Handbook of Drought Indicators and Indices: Standardized Precipitation Index (SPI)*.
- Jiang, S. (2020). *What are quintiles?* Investopedia.
- Keyantash, J. (2023). *National Center for Atmospheric Research Staff. The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Index (SPI)*. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>.
- L'Heureux, M. (2014). *What is the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) in a nutshell?* ENSO Blog. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-el-ni%C3%B1o%E2%80%93southern-oscillation-enso-nutshell>.
- Lindsey, R. (2009). *Climate Variability: Oceanic Niño Index*. Extraído de: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-nino->

index#:~:text=The%20Oceanic%20Ni%C3%B1o%20Index%20(ONI,Pacific%2C%20near%20the%20International%20Dateline.

- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. (2002). *A drought climatology for Europe*. International Journal of Climatology. Int. J. Climatol. 22: 1571–1592 (2002). Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/joc.846.
- Macleod, M., Knapp, J., Gregory, W., & Pozo, H. (2016). *Republic of Ecuador*. Encyclopaedia Britannica.
- Martinson, D. (2018). *Empirical Orthogonal Function (EOF) Analysis*. In Quantitative Methods of Data Analysis for the Physical Sciences and Engineering (pp. 495–534). chapter, Cambridge: Cambridge University Press.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration of Time Scales*. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.
- Mora, D. E., & Willems, P. (2012). *Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin - Southern Andes of Ecuador*. Theor Appl Climatol 108, 267–282. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0527-4>.
- Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J. I., Aguilar, E., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., . . . Vicente-Serrano, S. M. (2016). *Climate trends and variability in Ecuador (1966-2011)*. Int. J. Climatol. 36: 3839–3855. Wiley Online Library. DOI: 10.1002/joc.4597.
- NOAA. (2023). *El Niño*. National Geographic Society. Extraído de: <https://education.nationalgeographic.org/resource/el-nino/>.
- NOAA. (s.f.). *Equatorial Sea Surface Temperatures: Niño Regions*. National Centers for Environmental Information.
- Nouvelot, J.-F., Le Goulven, P., Pourrut, P., & Alemán, M. (1995). *El Agua en el Ecuador, clima, precipitaciones, escorrentía*. Colegio de Geógrafos del Ecuador. Estudios de Geografía. Volumen 7, capítulo IV.
- Ocampo-Marulanda, C., Fernández-Álvarez, C., Cerón, W., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Alfonso-Morales, W. (2022). *A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis*. Ain Shams Engineering Journal. DOI: 10.1016/j.asej.2022.01.014.
- Ocles. (2018). *Proyectos de Infraestructura para Control de Inundaciones en Ecuador*. INOCAR-Ecuador, 1986, “El Fenómeno de ‘El Niño’ y la Oscilación Sur (ENSO)”, Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines.

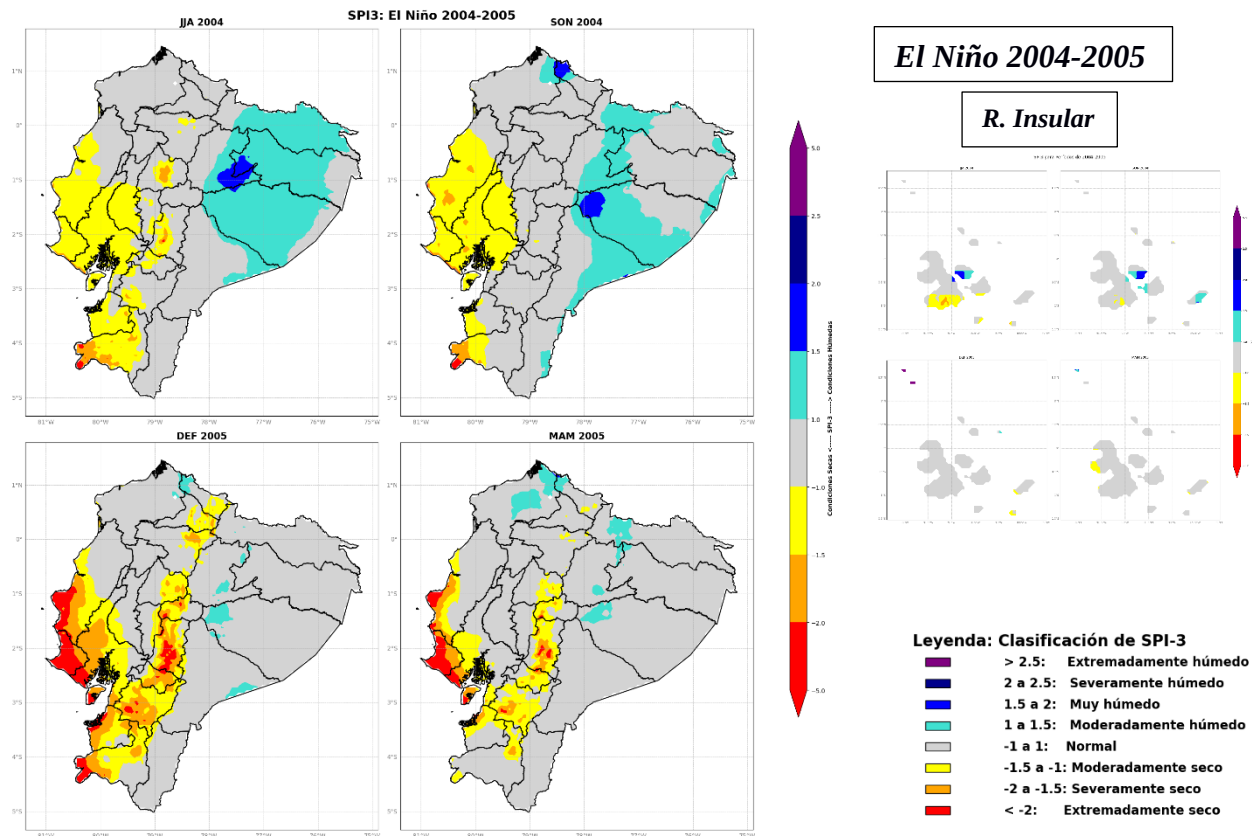
- Oliveira Neces, A., & Nogueira Vilanova, M. (2021). *Characterization of the 2010-decade historical drought in Paraiba do Sul River Basin, São Paulo State, Brazil*. Artigo Técnico • Eng. Sanit. Ambient. 26 (2) • Mar-Apr 2021 • <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190023>.
- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2016). *Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America - emphasis in regional drought occurrences*. Adv. Geosci., 42, 1–14, <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>, 2016.
- Perkel, J. (2018). *Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice*. Nature.
- Radia, G., Kamila, B., & Abderrazak, B. (2021). *Highlighting drought in the Wadi Lakhdar Watershed Tafna, Northwestern Algeria*. Arab J Geosci 14, 984 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07094-3>.
- Rodriguez-Ojeda, L. (2007). *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Guayaquil-Ecuador: ISBN: 789-9942-922-02-1 .
- Rossel, F. (1997). *Influencia de El Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador*. Quito: Serie INSEQ NRO 18. INAMHI & ORSTOM.
- Singh, R., & Shukla, P. (2020). *Drought Characterization Using Drought Indices and El Niño Effects*. National Academy Science Letters. DOI: 10.1007/s40009-019-00870-6.
- Suryanarayana, T., & Malakiya, A. (2016). *Assessment of Drought Using Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI): A Case Study of Amreli District*.
- Takahashi , K., Mosquera, K., & Reupo, J. (2014). *El Índice Costero El Niño (ICEN): Historia y actualización. Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*. Instituto Geofísico del Perú, 1 (2), 8-9. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4639>.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). *Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition)*. Pages 303-362, ISBN 9780750645522, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10010-1>.
- Thielen, D. R., Ramoni-Perazzi, P., Zamora-Ledezma, E., Puche, M. L., Marquez, M., Quintero, J., . . . Arizapana-Almonacid, M. A. (2023). *Effect of extreme El Niño events on the precipitation of Ecuador*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 23, 1507–1527, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1507-2023>, 2023.
- Trenberth, K. (1997). *The Definition of El Niño*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 2771-2777. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2).

- Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). *Indices of el Niño Evolution*. J. Climate, 14, 1697-1701, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2).
- Vicente-Serrano, S., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., . . . Nieto, R. (2016). *The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador*. Clim Dyn 48, 405–427. DOI 10.1007/s00382-016-3082-y.
- Vos, R., Velasco, M., & De Labastida, E. (1999). *Economic and Social Effects of El Niño in Ecuador, 1997-1998*. Washington, D.C.: Inter-American Development Bank. Sustainable Development Department Technical Papers Series .
- Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., & Lagos, O. (2017). *Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile*. Atmospheric Research, Volume 186, 2017, Pages 26-42, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.006>.
- Zambrano-Mera, Y., Rivadeneira-Vera, J., & Pérez-Martín, M. (2018). *El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian Coast*. The Science of the Total Environment. 643:193-207. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.160.
- Zhang, Z., & Moore, J. (2015). *Chapter 6 - Empirical Orthogonal Functions*. Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change. Pages 161-197.
- Zhu, Q., Luo, Y., Zhou, D., Xu, Y.-P., Wang, G., & Gao, H. (2019). *Drought Monitoring Utility using Satellite-Based Precipitation Products over the Xiang River Basin in China*. Remote Sens. 2019, 11(12), 1483; <https://doi.org/10.3390/rs11121483>.

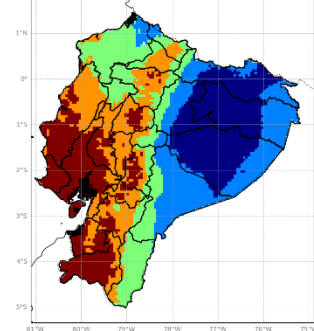
Apéndice A

Atlas de los Años Niño (Índice Estandarizado de Precipitación), Ecuador Continental

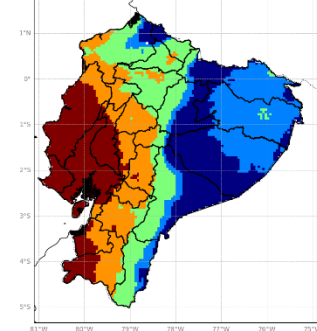
A) Eventos Débiles



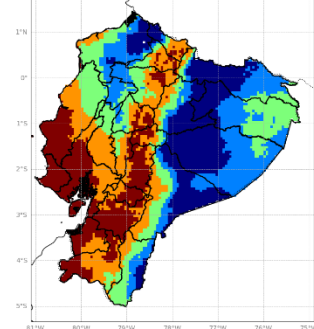
Quintiles de precipitación para JJA 2004



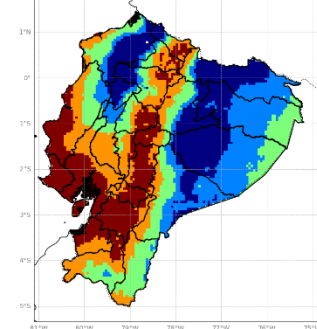
Quintiles de precipitación para SON 2004



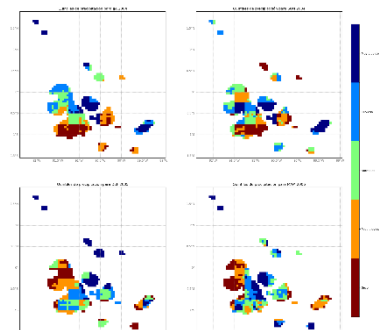
Quintiles de precipitación para DEF 2005

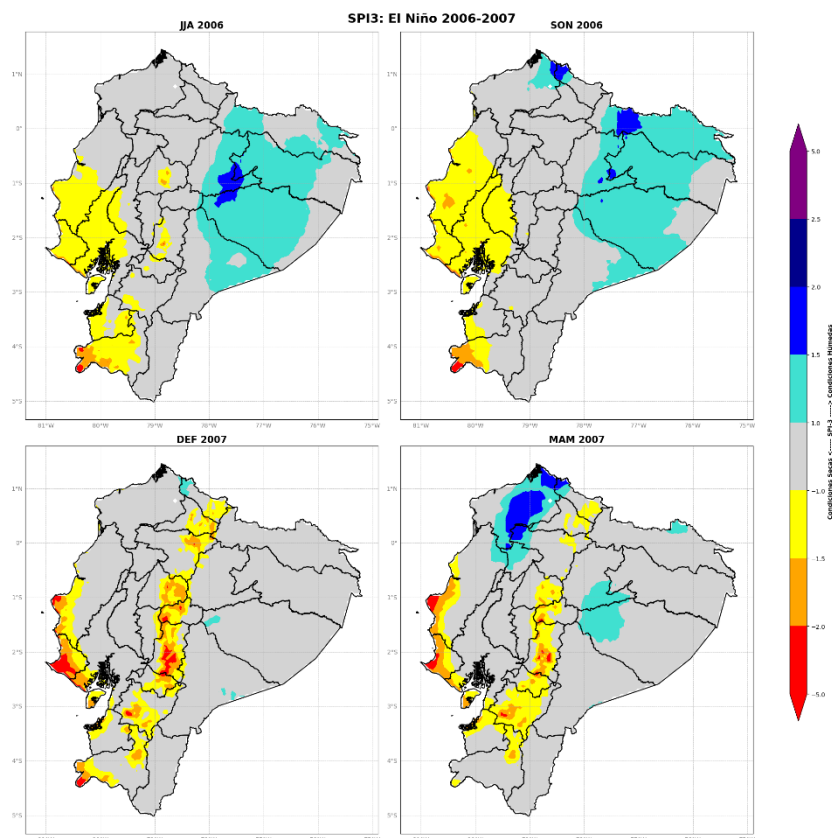


Quintiles de precipitación para MAM 2006



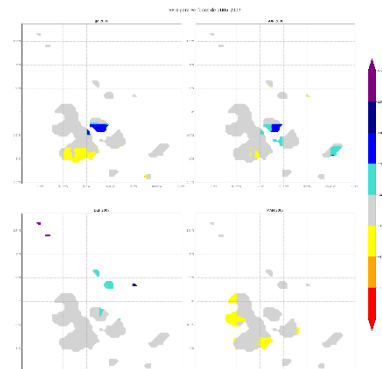
R. Insular





El Niño 2006-2007

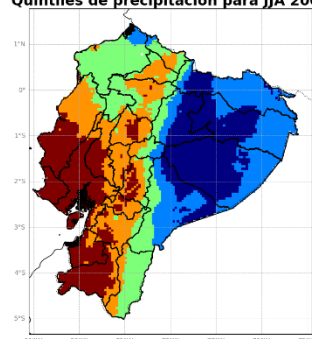
R. Insular



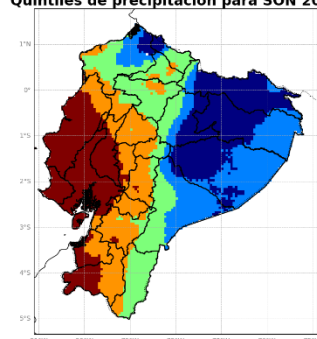
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- -1 a 1: Normal
- -1.5 a -1: Moderadamente seco
- -2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

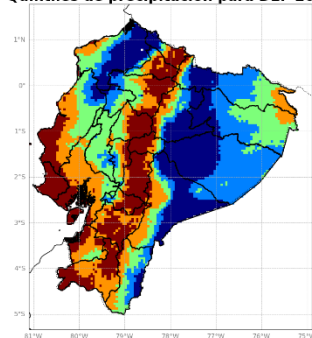
Quintiles de precipitación para JJA 2006



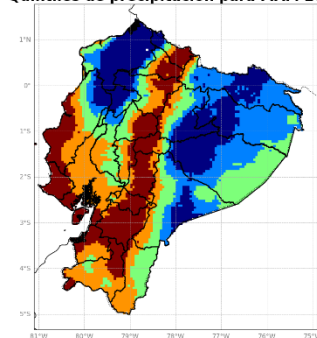
Quintiles de precipitación para SON 2006



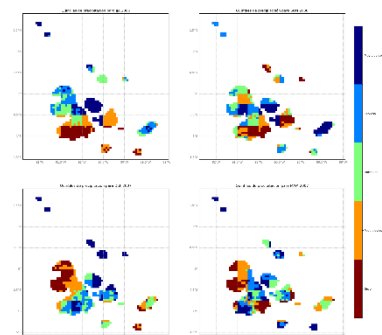
Quintiles de precipitación para DEF 2007

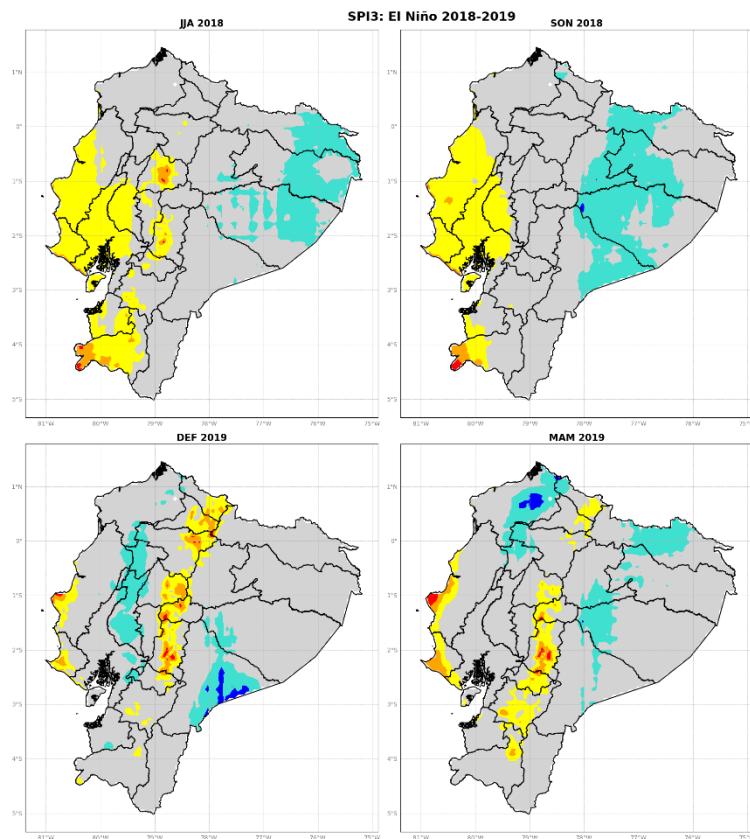


Quintiles de precipitación para MAM 2007



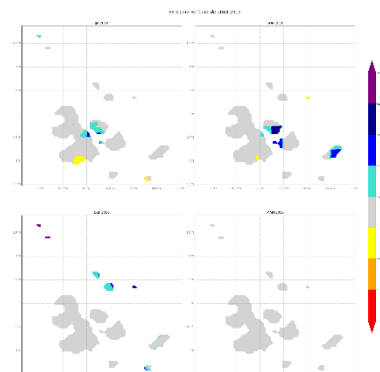
R. Insular





El Niño 2018-2019

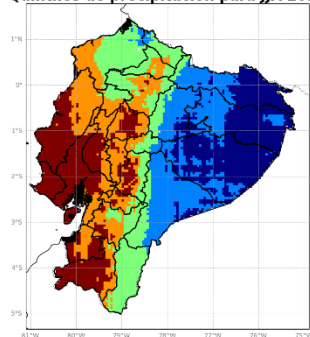
R. Insular



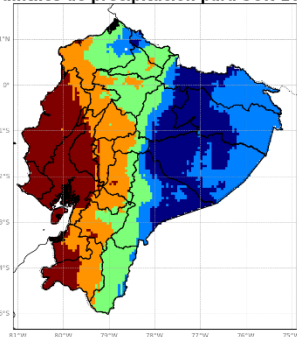
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- -1 a 1: Normal
- -1.5 a -1: Moderadamente seco
- -2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

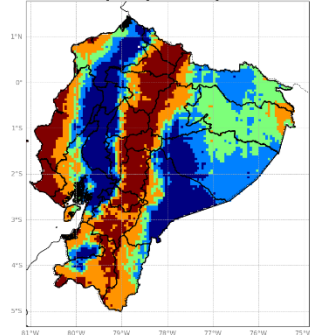
Quintiles de precipitación para JJA 2018



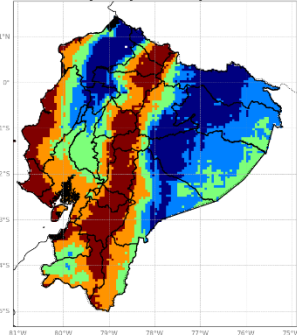
Quintiles de precipitación para SON 2018



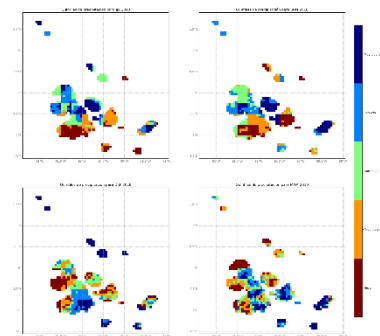
Quintiles de precipitación para DEF 2019



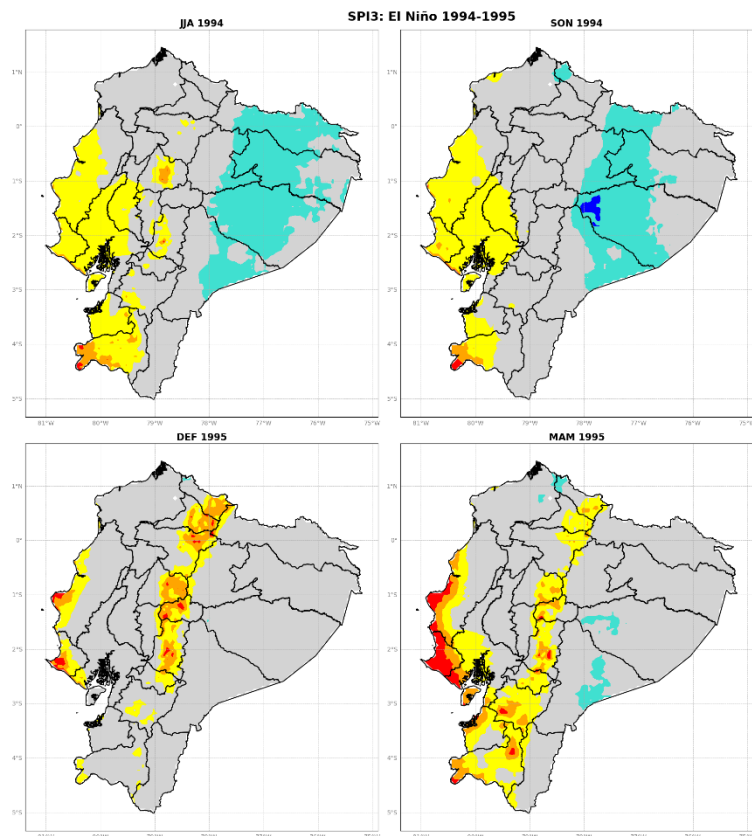
Quintiles de precipitación para MAM 2019



R. Insular

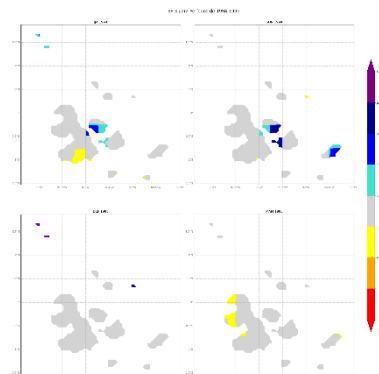


B) Eventos Moderados



El Niño 1994-1995

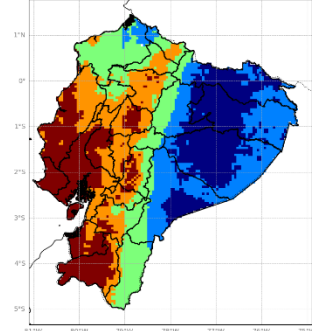
R. Insular



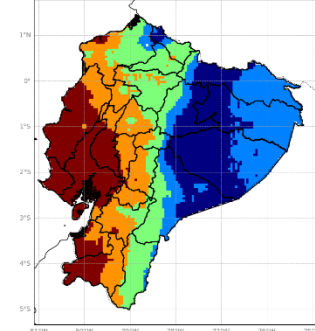
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

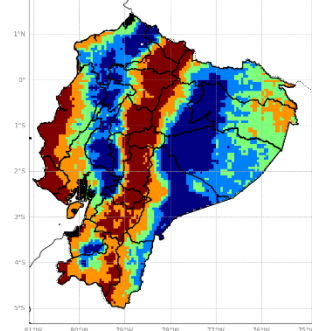
Quintiles de precipitación para JJA 1994



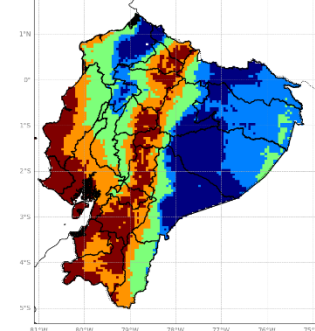
Quintiles de precipitación para SON 1994



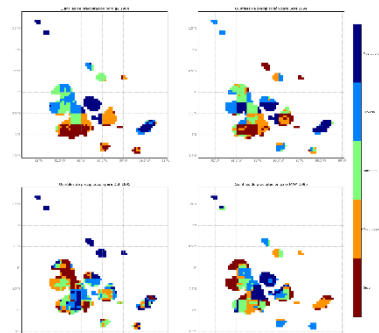
Quintiles de precipitación para DEF 1995

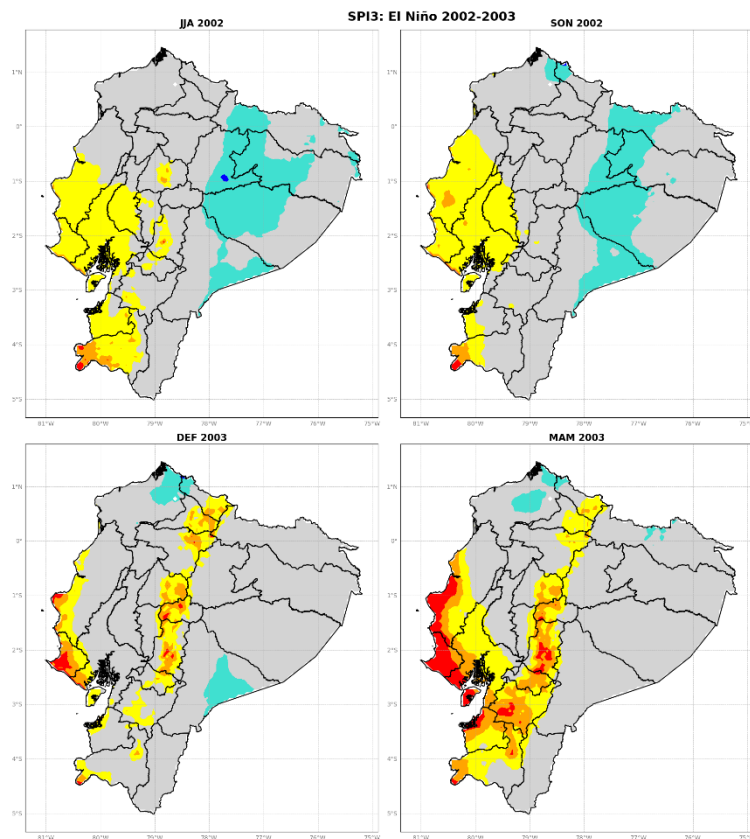


Quintiles de precipitación para MAM 1995



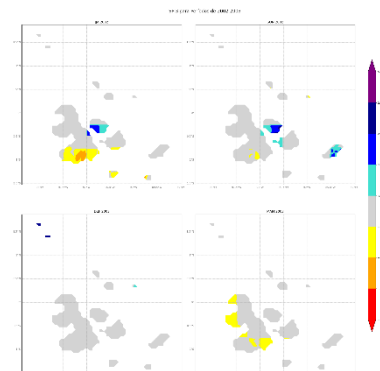
R. Insular





El Niño 2002-2003

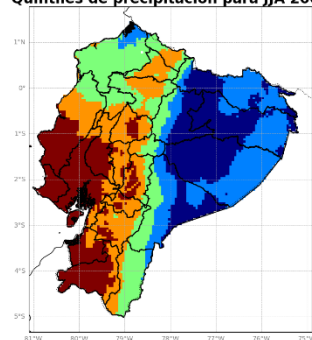
R. Insular



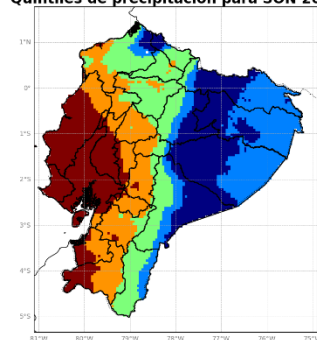
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

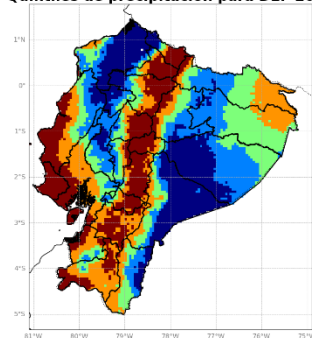
Quintiles de precipitación para JJA 2002



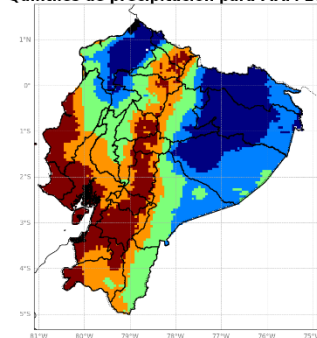
Quintiles de precipitación para SON 2002



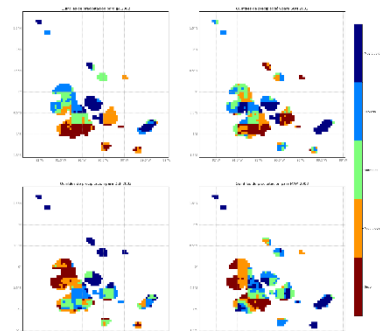
Quintiles de precipitación para DEF 2003

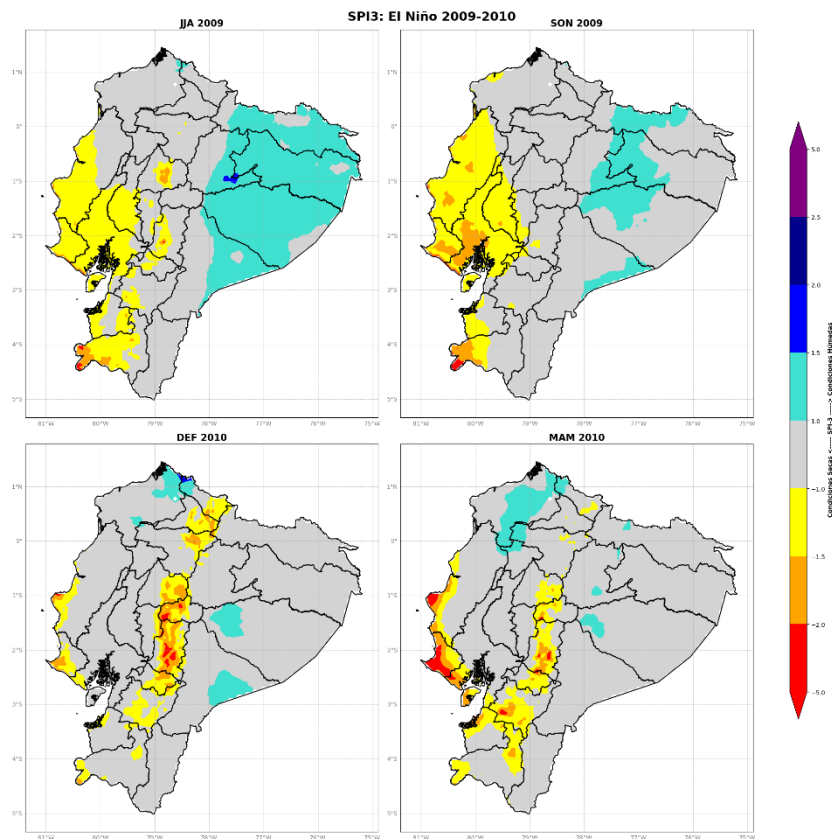


Quintiles de precipitación para MAM 2003



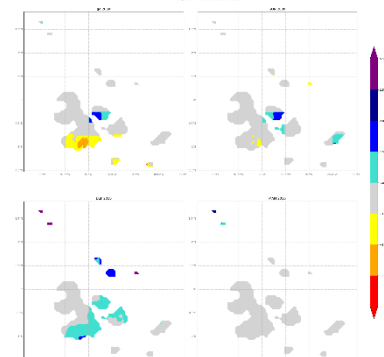
R. Insular





El Niño 2009-2010

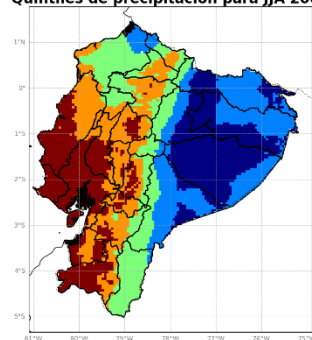
R. Insular



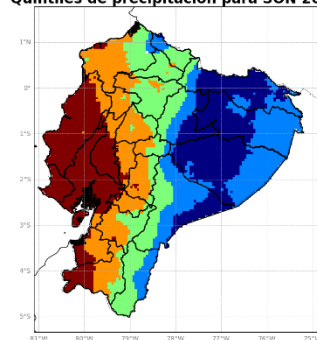
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

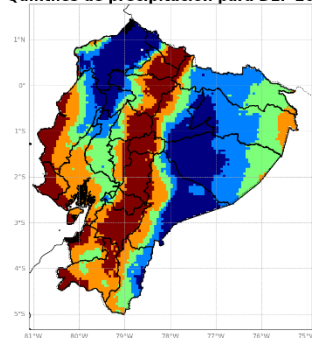
Quintiles de precipitación para JJA 2009



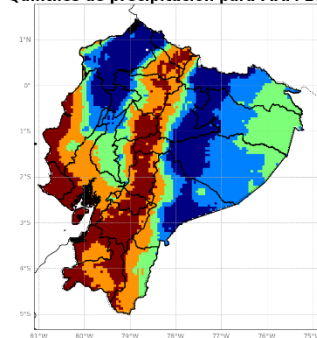
Quintiles de precipitación para SON 2009



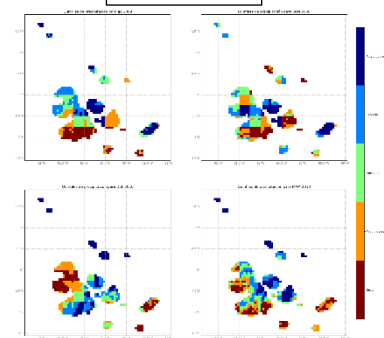
Quintiles de precipitación para DEF 2010



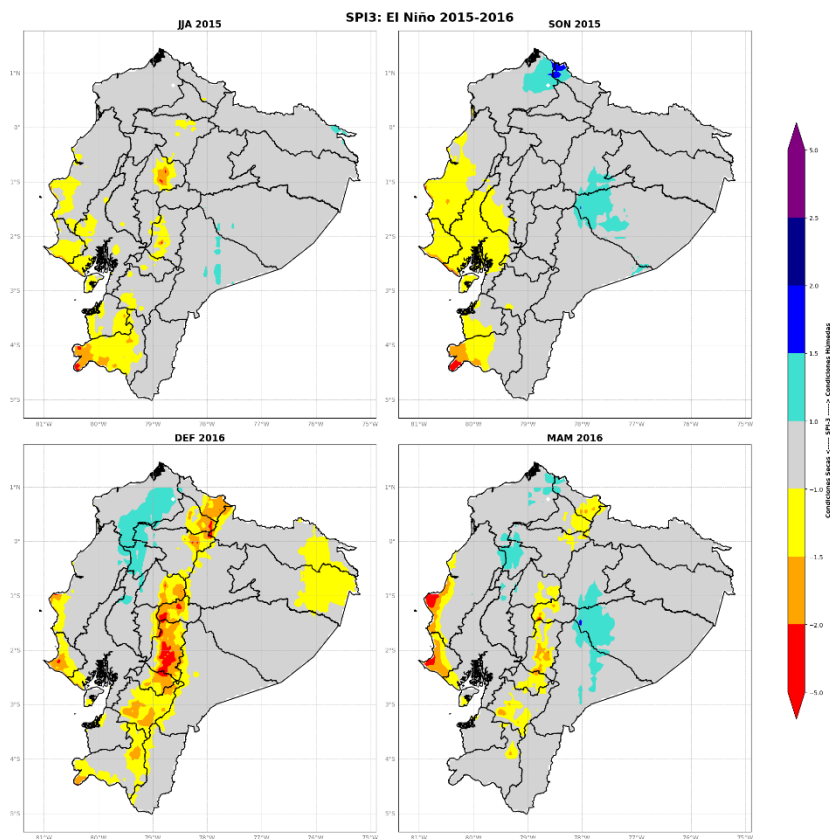
Quintiles de precipitación para MAM 2010



R. Insular

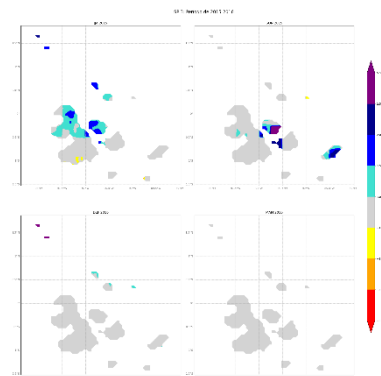


C) Fuertes Tipo I



El Niño 2015-2016

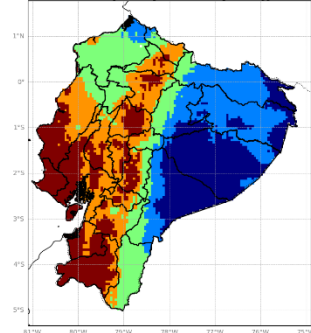
R. Insular



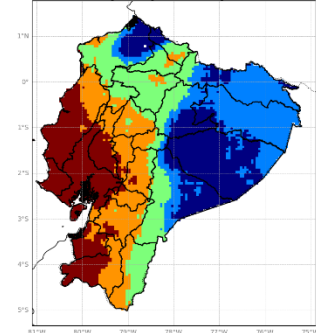
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

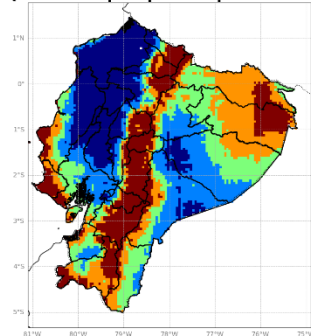
Quintiles de precipitación para JJA 2015



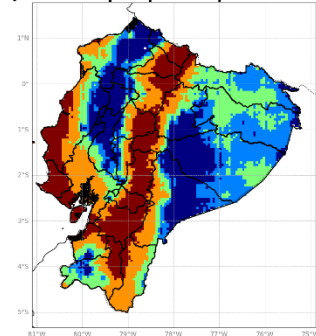
Quintiles de precipitación para SON 2015



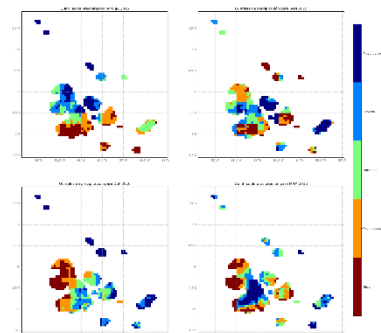
Quintiles de precipitación para DEF 2016

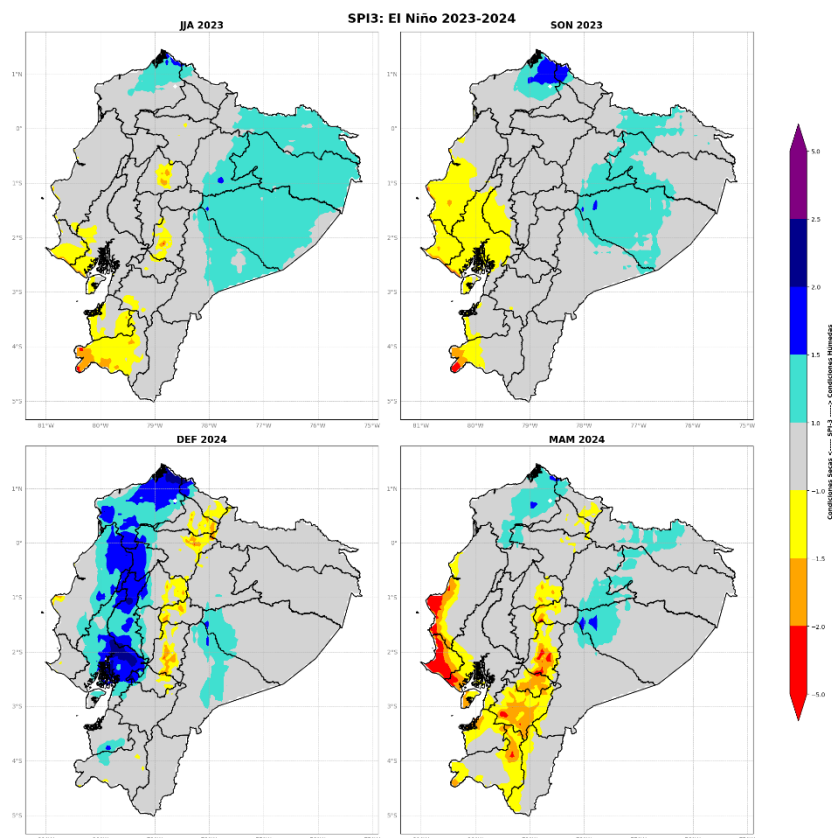


Quintiles de precipitación para MAM 2016



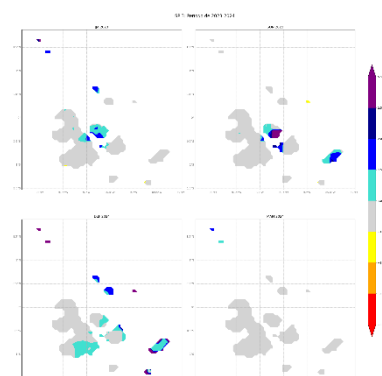
R. Insular





El Niño 2023-2024

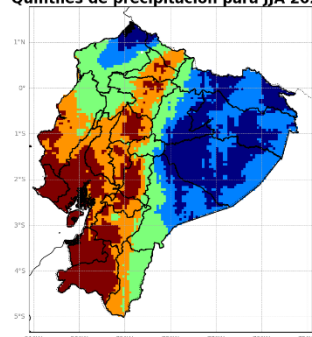
R. Insular



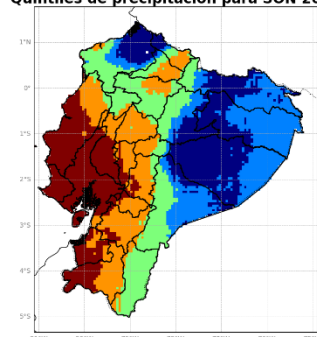
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

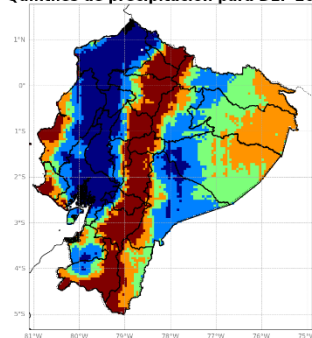
Quintiles de precipitación para JJA 2023



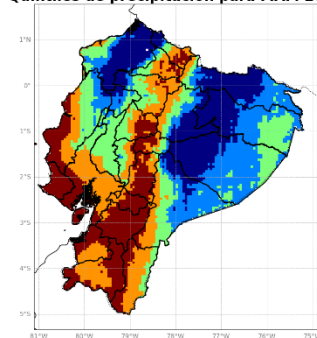
Quintiles de precipitación para SON 2023



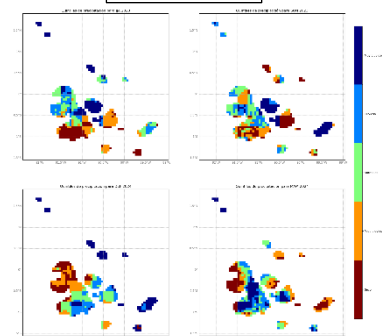
Quintiles de precipitación para DEF 2024



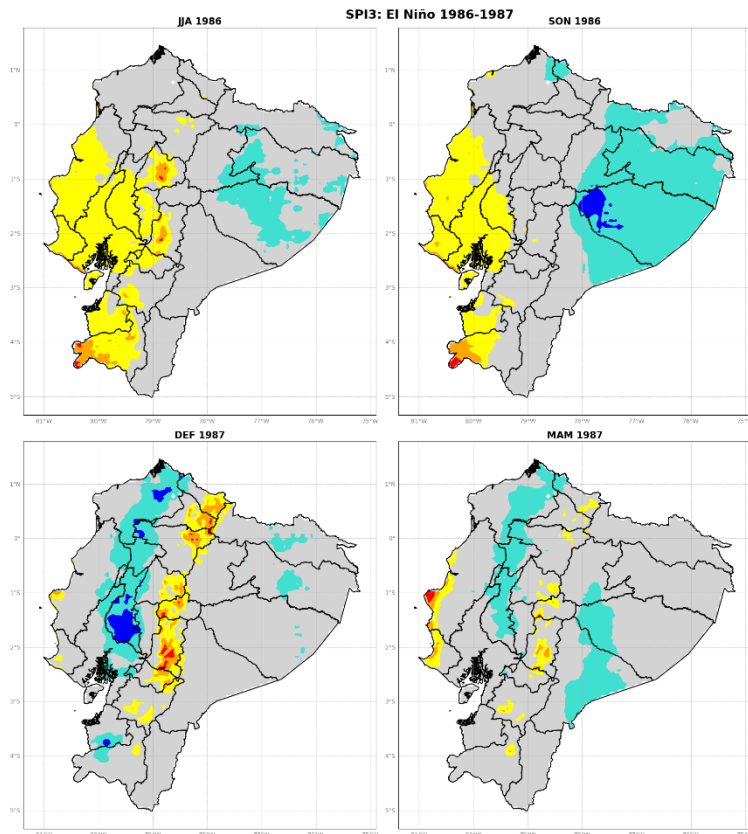
Quintiles de precipitación para MAM 2024



R. Insular

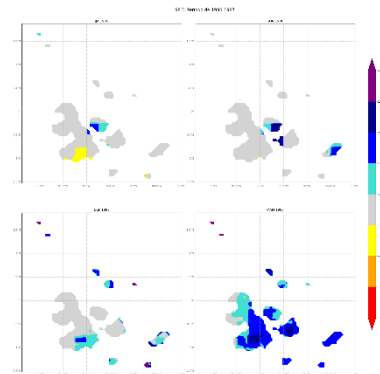


D) Fuertes Tipo II



El Niño 1986-1987

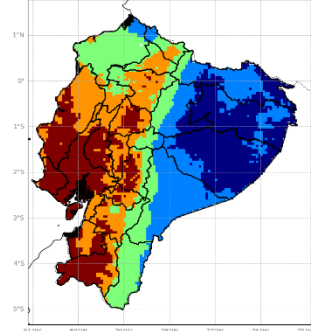
R. Insular



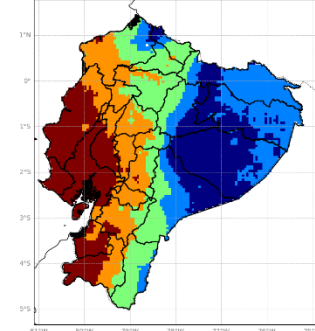
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

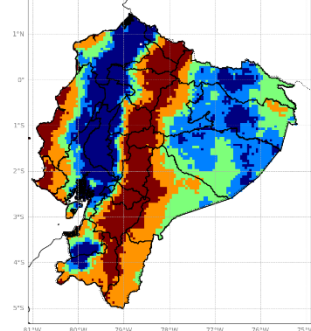
Quintiles de precipitación para JJA 1986



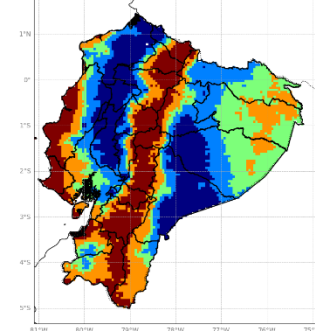
Quintiles de precipitación para SON 1986



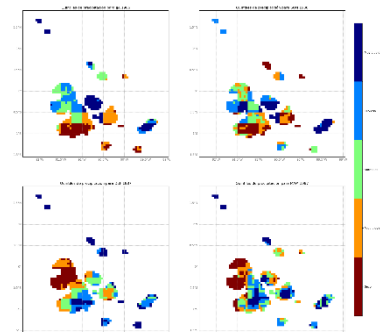
Quintiles de precipitación para DEF 1987

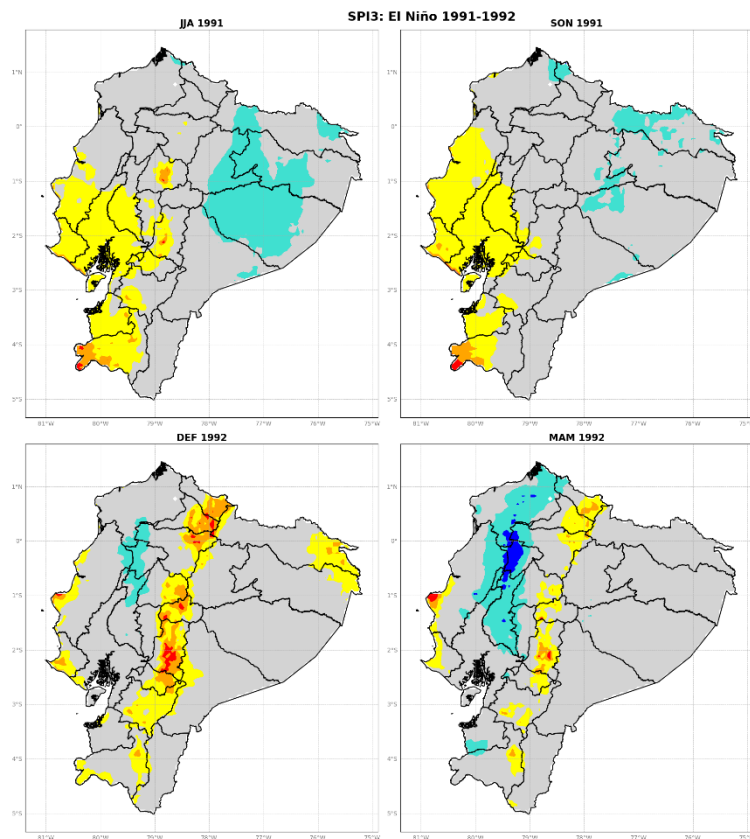


Quintiles de precipitación para MAM 1987



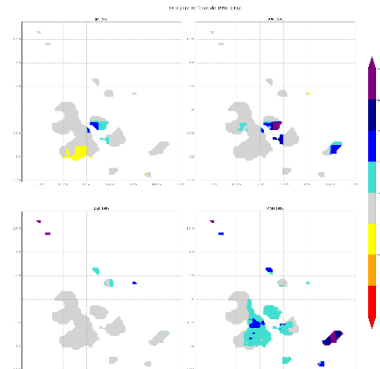
R. Insular





El Niño 1991-1992

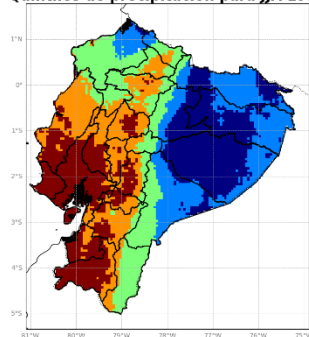
R. Insular



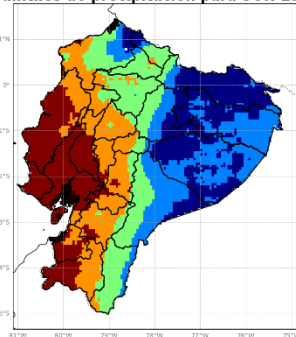
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

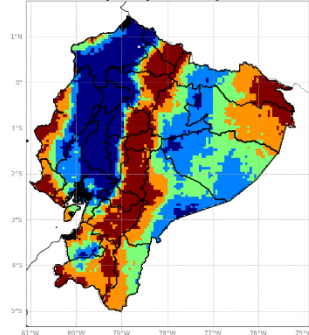
Quintiles de precipitación para JJA 1991



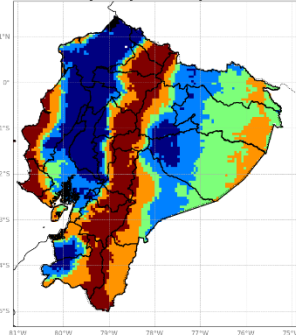
Quintiles de precipitación para SON 1991



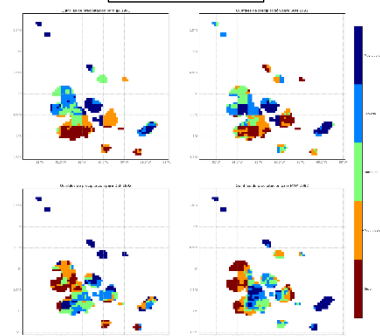
Quintiles de precipitación para DEF 1992



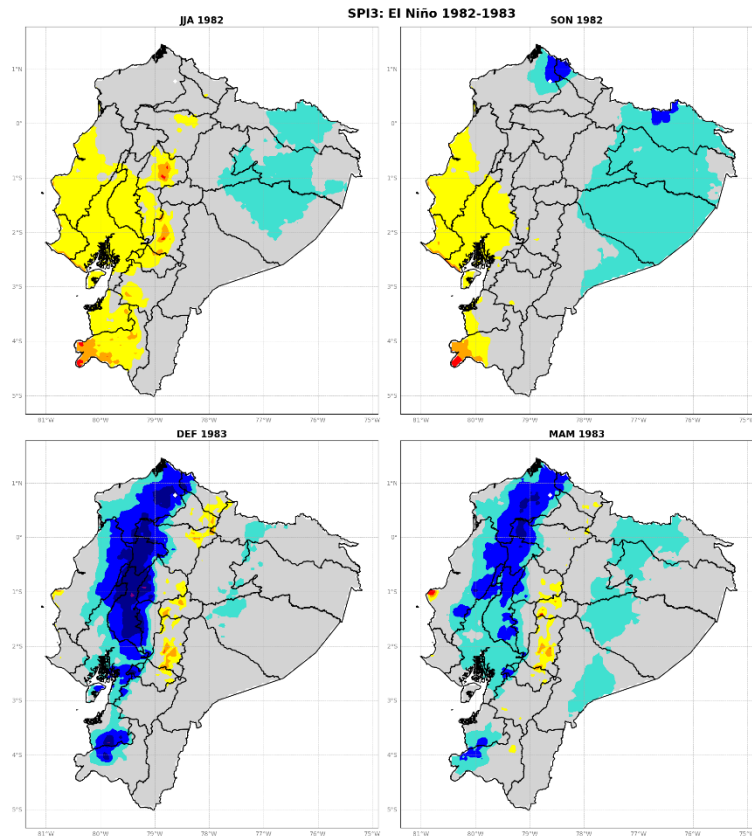
Quintiles de precipitación para MAM 1992



R. Insular

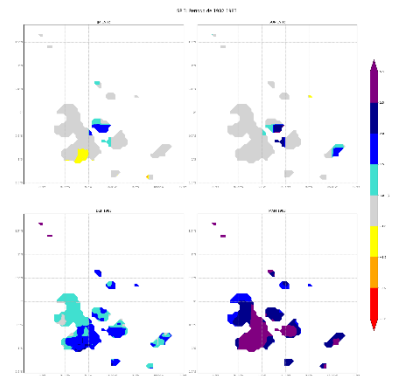


E) Eventos Muy fuertes



El Niño 1982-1983

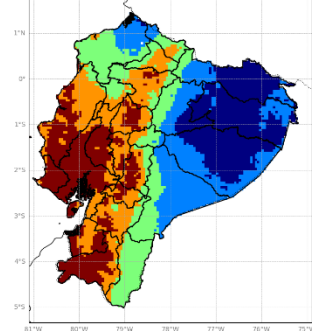
R. Insular



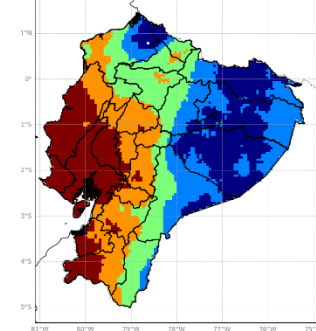
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

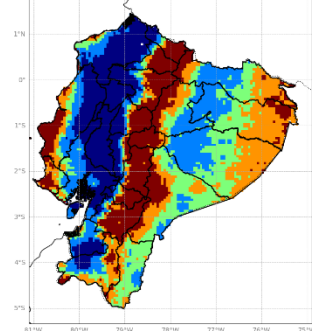
Quintiles de precipitación para JJA 1982



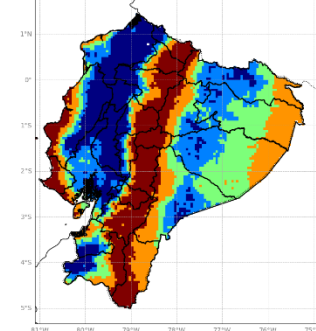
Quintiles de precipitación para SON 1982



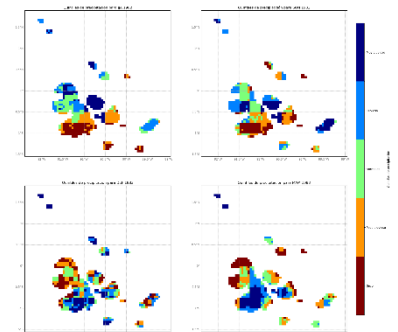
Quintiles de precipitación para DEF 1983

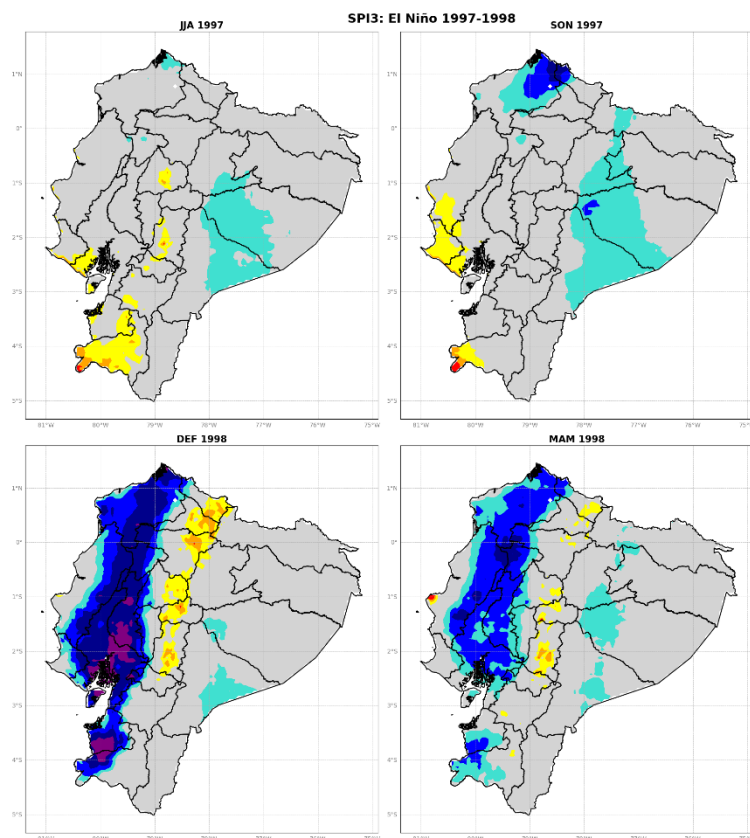


Quintiles de precipitación para MAM 1983



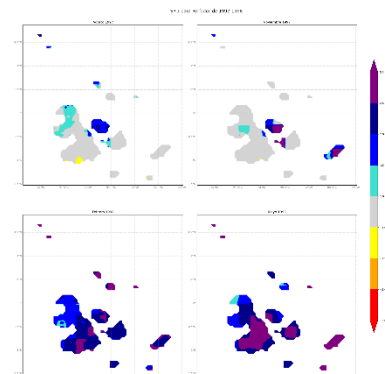
R. Insular





El Niño 1997-1998

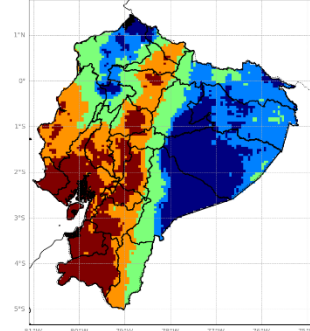
R. Insular



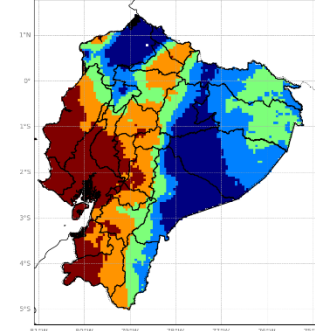
Legenda: Clasificación de SPI-3

- > 2.5: Extremadamente húmedo
- 2 a 2.5: Severamente húmedo
- 1.5 a 2: Muy húmedo
- 1 a 1.5: Moderadamente húmedo
- 1 a 1: Normal
- 1.5 a -1: Moderadamente seco
- 2 a -1.5: Severamente seco
- < -2: Extremadamente seco

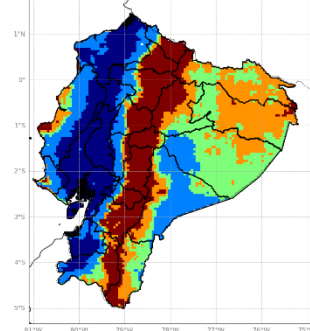
Quintiles de precipitación para JJA 1997



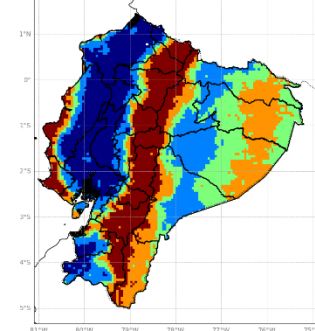
Quintiles de precipitación para SON 1997



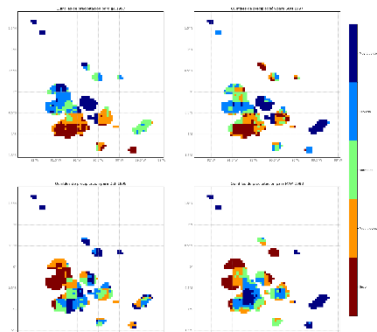
Quintiles de precipitación para DEF 1998



Quintiles de precipitación para MAM 1998



R. Insular



Apéndice B

Código del SPI

```
def calcular_parametros_gamma(data):
```

```
    n = len(data) # Número de observaciones de precipitación
```

```
    mean = np.mean(data)
```

```
    sum_log_data = np.sum(np.log(data))
```

```
    A = np.log(mean) - (sum_log_data / n)
```

```
    alpha = (1 / (4 * A)) * (1 + np.sqrt(4 * A / 3))
```

```
    beta = mean / alpha
```

```
return alpha, beta
```

```
def calcular_parametros_mensuales(ds, inicio_periodo, fin_periodo, umbral, dimension='time', umbral_cero=0.05):
```

```
    meses = np.arange(1, 13)
```

```
    parametros_mensuales = {}
```

```
    suma_datos = ds.rolling({dimension: umbral}, min_periods=1, center=False).sum() # Umbral = Tipo de SPI  
(3,6,12 meses)
```

```
    for mes in meses:
```

```
        ### Seleccionar datos para el mes específico y periodo
```

```
        datos_mes = suma_datos.sel({dimension: suma_datos[dimension].dt.month == mes})
```

```
        datos_ref = datos_mes.sel({dimension: (datos_mes[dimension].dt.year >= inicio_periodo) &  
                                     (datos_mes[dimension].dt.year <= fin_periodo)})
```

```
        ### Aplanar los datos
```

```
        val_ref = datos_ref.values.flatten()
```

```
        ### Calcular la probabilidad de precipitación cero segun el tipo de SPI
```

```
        prob_precip_cero = (val_ref < umbral_cero).mean()
```

```
        ### Filtrar valores no positivos (considerando umbral_cero) en caso de que existan
```

```
        val_ref = val_ref[val_ref > umbral_cero]
```

```
        if len(val_ref) == 0:
```

```
            raise ValueError(f"No hay valores positivos para el mes {mes} en el periodo de referencia.")
```

```
        alfa, beta = calcular_parametros_gamma(val_ref) ###Valores gamma
```

```
        parametros_mensuales[mes] = {'alfa': alfa, 'beta': beta, 'prob_precip_cero': prob_precip_cero} #almacena
```

```
return parametros_mensuales
```

```

def spi_thorn(ds, umbral, dimension='time', inicio_periodo=1991, fin_periodo=2020):
    dims_espaciales = [dim for dim in ds.dims if dim != dimension] #Dimensiones
    suma_datos = ds.rolling({dimension: umbral}, min_periods=1, center=False).sum() #Depende de que SPI deseo
    ## Climatología
    parametros_mensuales = calcular_parametros_mensuales(ds, inicio_periodo, fin_periodo, umbral, dimension)
    valores_spi = np.full_like(suma_datos.values, np.nan) ##array
    ### Cálculo de SPI
    for mes in range(1, 13):
        datos_mes = suma_datos.sel({dimension: suma_datos[dimension].dt.month == mes})
        # Obtener parámetros para el mes actual
        alfa = parametros_mensuales[mes]['alfa']
        beta = parametros_mensuales[mes]['beta']
        prob_precip_cero = parametros_mensuales[mes]['prob_precip_cero']
        cdf_gamma = st.gamma.cdf(datos_mes, a=alfa, scale=beta) ## Calcular la CDF gamma
        if prob_precip_cero > 0:
            cdf_gamma_ajustada = prob_precip_cero + (1 - prob_precip_cero) * cdf_gamma # Gamma ajustada y PPC
        else:
            cdf_gamma_ajustada = cdf_gamma #No hay ajuste si PPC = A 0
        spi_mes = st.norm.ppf(cdf_gamma_ajustada) #Transformar a SPI
        valores_spi[suma_datos[dimension].dt.month == mes] = spi_mes # Almacenar los valores SPI
    spi_array = xr.DataArray(valores_spi, coords=suma_datos.coords, dims=suma_datos.dims) #transforma a xarray
    spi_array = spi_array.where(np.isfinite(spi_array), np.nan) # Manejar valores infinitos y Nans

    return spi_array

```