ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

“ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y SU RELACIÓN CON PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES EN EL PÁRAMO ECUATORIAL ENTRE EL AÑO 2001 Y 2018”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

KARLA YADIRA UVIDIA ZAMBRANO
karla.uvidia@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS., MSc., PhD
xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, octubre 2020

DECLARACIÓN

Yo, Karla Yadira Uvidia Zambrano, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por su normativa institucional vigente.

_____

Karla Yadira Uvidia Zambrano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Karla Yadira Uvidia Zambrano, bajo mi supervisión.

_____

ING. XAVIER EDUARDO ZAPATA RÍOS

DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIJ 17-05 “LOS PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES Y SU INFLUENCIA EN LA RESPUESTA TEMPORAL Y ESPACIAL DE ÍNDICES ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN DEL PÁRAMO EN EL ECUADOR”, que se ejecuta en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA).

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que han contribuido a lo largo de este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, ya que gracias a su apoyo y amor incondicional he podido culminar este objetivo más en mi vida. Gracias por ser mí mejor ejemplo de perseverancia y mi soporte diario para cumplir mis sueños, a pesar de mis desaciertos. Por todo el esfuerzo que han tenido que hacer para llegar hasta este momento de mi vida, estoy consciente que jamás podré recompensarlos, pero esto es una pequeña retribución de ello.

A mi hermano por haberme enseñado varias lecciones de vida y espero que siempre tenga presente que mi apoyo y cariño hacia él es incondicional. A mis familiares, por los ánimos que me han brindado a lo largo de este proceso y por la unión que siempre han forjado en nuestro hogar.

Al proyecto PIJ 17-05, el cual me acogió en los últimos meses de mi carrera universitaria como ayudante de investigación, permitiéndome poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de estos años. Un agradecimiento a todas las personas que lo conforman, en especial a mi director de tesis, el Dr. Xavier Zapata Ríos, el cual ha sido mi guía permanente en la ejecución de este proyecto. Quisiera expresarle mi gratitud y admiración. Gracias por sus consejos, experiencias compartidas y sobre todo por transmitirme aquella pasión por la investigación.

A mi mejor amiga Diana, una de las personas más fuertes e incondicionales que he conocido, gracias por la complicidad, risas y hasta regaños. A mis amigos: Jessy, Pao y a mis beginners por todas las risas, salidas, novatadas, giras y por la dicha de haberlos conocido y compartir una parte de mi vida con ustedes, no sabremos qué sucederá en el futuro, pero sé que siempre los llevaré conmigo.

Finalmente, a mi amada Escuela Politécnica Nacional, la cual me abrió sus puertas y me permitió conocer a muchos de los maestros y compañeros que han sido mi fuente de inspiración y conocimiento para permitirme crecer personal y profesionalmente. Les estaré eternamente agradecida.

DEDICATORIA

A mis padres Fabiola y Marco.

A mi hermano Marlon.

A toda mi familia, por siempre confiar en mí y apoyarme plenamente en cada etapa de mi vida, siendo un pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

ÍNDICE

DECLARACIÓN I

CERTIFICACIÓN II

AUSPICIO III

AGRADECIMIENTO IV

DEDICATORIA V

CAPÍTULO 1 1

ASPECTOS GENERALES 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1

1.2 OBJETIVOS 2

1.2.1 OBJETIVO GENERAL 2

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

1.3 HIPÓTESIS 3

1.4 JUSTIFICACIÓN 3

1.5 ALCANCE 5

CAPÍTULO 2 6

2 ESTADO DEL ARTE 6

2.1 ESTUDIOS REVISADOS SOBRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN 6

2.1.1 NIVEL GLOBAL 6

2.1.2 NIVEL REGIONAL 7

2.1.3 NIVEL LOCAL 7

2.2 ESTUDIOS REVISADOS SOBRE PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES 9

2.2.1 NIVEL GLOBAL 9

2.2.2 NIVEL REGIONAL 10
2.2.3 NIVEL LOCAL 11
CAPÍTULO 3 13
3 MARCO TEÓRICO 13
3.1 TELEDETECCIÓN 13
3.1.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO 13
3.1.2 SENSORES REMOTOS 14
3.1.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA 16
3.2 CLIMA 19
3.2.1 FACTORES CONDICIONANTES 19
3.2.2 PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES (PCG) 23
3.2.3 CLIMA DEL ECUADOR 33
3.3 LOS PARAMOS 35
3.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES 35
3.3.2 IMPORTANCIA 36
CAPITULO 4 37
4 METODOLOGÍA 37
4.1 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN 37
4.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES 38
4.2.1 GENERACIÓN DE MOSAICOS 38
4.2.2 DELIMITACIÓN DEL PÁRAMO 39
4.2.3 ANÁLISIS DE CALIDAD DE NDVI 40
4.2.4 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 40
4.2.5 INTERPOLACIÓN DE DATOS DE SERIES DE TIEMPO 42
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS 48

4.3.1 ANÁLISIS TEMPORAL 49
4.3.2 ANÁLISIS ESPACIAL 51
4.3.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL 53
4.3.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI Y PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES 53
CAPÍTULO 5 57
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 57
5.1 ANÁLISIS TEMPORAL DE NDVI 57
5.2 ANÁLISIS ESPACIAL 73
5.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL 80
5.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE NDVI Y PCG 89
CAPÍTULO 6 111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 111
6.1 CONCLUSIONES 111
6.2 RECOMENDACIONES 115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 116
ANEXOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXOS 1 ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXOS 2 ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ANEXOS 3 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Diagrama del espectro electromagnético. 13
Figura 3.2. Sensores remotos activos y pasivos. 14
Figura 3.3. Diferentes tipos de resolución en teledetección. 15
Figura 3.4. Fórmula para el cálculo de NDVI. 16
Figura 3.5. Espectro de absorción y reflectancia de una planta. 17
Figura 3.6. Reflectancia del rojo e infrarrojo en la vegetación. 18
Figura 3.7. Interacción de corrientes marinas en las costas este del Pacífico..... 20
Figura 3.8. Patrones de movimiento de masas de aire provenientes de norte y sur, con respecto a la línea ecuatorial. 21
Figura 3.9. Mapa topográfico representando las principales cordilleras y elevaciones del Ecuador. 22
Figura 3.10. Posición geográfica de los Patrones Climáticos Globales más utilizados a nivel mundial. 23
Figura 3.11. Fases de la Oscilación Antártica. 24
Figura 3.12. Anomalías del índice AAO. 25
Figura 3.13. Definición de regiones El Niño 1+2, 3, 4 y 3.4 sobre el Pacífico ecuatorial. 27
Figura 3.14. Variaciones de la TSM en la región Niño 1+2 y Niño 3.4. 27
Figura 3.15. Anomalías del índice MEI. 28
Figura 3.16. Variación en la presión atmosférica del índice NAO. 29
Figura 3.17 Anomalías del índice NAO. 30
Figura 3.18. Variación en la temperatura durante el evento de PDO. 30
Figura 3.19. Relación entre el fenómeno ENOS y PDO. 31
Figura 3.20. Patrones de lluvia generados por el MJO en los trópicos (30N-30S) de acuerdo con sus fases de influencia. 32
Figura 4.1. Metodología a seguir en el procesamiento de los datos. 37
Figura 4.2. Cuadrantes del sensor MODIS utilizados. 38
Figura 4.3. Generación de mosaicos para NDVI y Pixel Reliabilty, día 1 año 2001. 39

Figura 4.4. Delimitación del páramo. 40
Figura 4.5. Área de estudio del páramo, día 1 año 2001. 42
Figura 4.6. Tipos de semivariogramas y su estructura. 43
Figura 4.7. Modelo de variograma de tipo exponencial para el día 1. 44
Figura 4.8. Interpolación espacial, día 1 año 2001. 45
Figura 4.9. Estructura para el reconocimiento de un archivo ASCII. 46
Figura 4.10. Serie de tiempo 21 interpolada temporalmente. 47
Figura 4.11. Reducción de la matriz de NDVI a valores mensuales. 48
Figura 4.12. Esquema de procedimiento realizado en el análisis temporal del NDVI. 50
Figura 4.13. Esquema de procedimiento realizado en el análisis espacial del NDVI. 52
Figura 4.14. Esquema de procedimiento realizado en el análisis de correlación entre NDVI y PCG. 55
Figura 5.1. Promedio espacial Intra-anual del NDVI por Ecosistemas. 58
Figura 5.2. Promedio intra-anual de NDVI, precipitación y temperatura de cada ecosistema. 62
Figura 5.3. Serie temporal de NDVI correspondiente a toda el área de estudio... 64
Figura 5.4. Promedio espacial anual de NDVI, para los 18 años de estudio. 65
Figura 5.5. Media móvil de 36 meses de anomalías de NDVI para el período 2001-2018. 68
Figura 5.6. Coeficiente de variación intra-anual por ecosistema. 70
Figura 5.7. Coeficiente de variación interanual por ecosistema. 72
Figura 5.8. Promedio temporal del NDVI reflejado espacialmente. 75
Figura 5.9. Promedio de todos los meses de mayo y septiembre del periodo de estudio. 77
Figura 5.10. Relación entre el coeficiente de variación (CV) y el NDVI. 79
Figura 5.11. Series temporales correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad. 81

Figura 5.12. Series temporales correspondientes a los puntos relevantes de acuerdo a su ubicación geográfica. 82
Figura 5.13. Promedio interanual correspondientes a los puntos relevantes por su ubicación geográfica. 84
Figura 5.14. Promedio interanual correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad. 85
Figura 5.15. Promedio intra-anual correspondientes a los puntos relevantes por su ubicación geográfica. 87
Figura 5.16. Promedio intra-anual correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad. 88
Figura 5.17. Coeficiente de correlación entre NDVI y AAO representado espacialmente. 90
Figura 5.18. Coeficiente de correlación entre NDVI y PDO representado espacialmente. 92
Figura 5.19. Coeficiente de correlación entre NDVI y MEI representado espacialmente. 94
Figura 5.20. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño1+2 representado espacialmente. 96
Figura 5.21. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño3 representado espacialmente. 98
Figura 5.22. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño 4 representado espacialmente. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020..... 100
Figura 5.23. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño 3.4 representado espacialmente. 102
Figura 5.24. Coeficiente de correlación entre NDVI y MJO representado espacialmente. 105
Figura 5.25. Coeficiente de correlación entre NDVI y NAO representado espacialmente. 107
Figura 5.26. Diagrama de cajas de las correlaciones anuales entre MEI y NDVI. 110

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Clasificación referencial de los valores crudos de NDVI. 18
Tabla 3.2. Eventos pasados del ENOS 26
Tabla 4.1. Porcentaje de datos en cada serie de tiempo 41
Tabla 4.2. Ecosistemas dentro del área de estudio..... 48
Tabla 4.3. Asignación de puntos al ecosistema correspondiente. 53

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

%	Porcentaje
AAO	Antarctic Oscillation
ACP	Análisis de Componentes Principales
CV	Coeficiente de variación
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
EOF	Empirical Ortogonal Function
km^2	Kilómetro cuadrado
MEI	Multivariate ENSO Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ONI	Oceanic Niño Index
PCG	Patrones Climáticos Globales
PNM	Presión del nivel del mar
ROL	Radiación de onda larga
SOI	Southern Oscillation Index
TSM	Temperatura de la superficie del mar
U	Vientos zonales de la superficie
V	Vientos meridionales de la superficie
ZCAS	Zona de Convergencia del Atlántico Sur
ZCIT	Zona de convergencia intertropical

RESUMEN

El páramo es un ecosistema caracterizado por una buena regulación hídrica, además de los recursos naturales y culturales que ofrece a la comunidad. A pesar de ello, estos han sido poco estudiados a lo largo de los años ya que la información generada, por la red pluviométrica existente y modelos computacionales, es muy gruesa, impidiendo conocer los efectos de los Patrones Climáticos Globales (PCG) en secciones espaciales de tamaño más reducido, como los páramos. Por tanto, el siguiente estudio pretende evaluar la dinámica espacio-temporal de la vegetación del páramo de Ecuador, a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), así como su correlación con los PCG durante el periodo 2001–2018, con el fin de generar información útil sobre el comportamiento de los páramos y su interacción con el clima. Para ello fue necesario el uso de series temporales de NDVI, construidas a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS. La variabilidad espacio-temporal fue analizada mediante métodos estadísticos tales como media, mínimos, máximos, entre otros; la tendencia de NDVI a través del test de Mann Kendall; y la correlación con los PCG mediante el coeficiente de Pearson (r).

Los resultados muestran que la actividad fotosintética responde a la disponibilidad de agua existente en el páramo, mostrando además, una variabilidad de la vigorosidad de la vegetación en toda su extensión, producto de la respuesta a factores como tipo de suelo, resiliencia de la cobertura vegetal, ubicación geográfica, entre otros. No se registró ninguna correlación significativamente fuerte entre los PCG y NDVI ($r < 0.5$), sin embargo, se evidenció que para el Índice ENSO Multivariado (MEI) existe un rápido reverdecimiento de la vegetación en los eventos de La Niña, seguido de una disminución de la vigorosidad en los años con eventos de El Niño, afectando principalmente a las tendencias de vegetación a corto plazo. Mientras que la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) registró una relación con el ENOS, evidenciando una intensificación de los eventos de El Niño (La Niña) durante una fase positiva (negativa) del PDO, mientras que una fase negativa

(positiva) lo debilita, afectando a las tendencias a largo plazo en el crecimiento de la vegetación.

Palabras Claves

MODIS, vegetación, páramo NDVI, Patrones Climáticos Globales.

ABSTRACT

Paramo is an ecosystem characterized by good water regulation, in addition to the natural and cultural resources it offers to the community. Despite this, these have been little studied over the years as the information generated, by the existing rainfall network and computational models, is very thick, preventing us from knowing the effects of Global Climate Patterns (PCG) on smaller space sections, such as the paramo. Therefore, the following study aims to evaluate the space-time dynamics of Ecuador's paramo vegetation, through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as well as its correlation with PCG during the period 2001–2018, in order to generate useful information on the behaviour of the paramo and their interaction with the climate. This required the use of NDVI time series, constructed from satellite images of the MODIS sensor. Space-time variability was analyzed using statistical methods such as mean, minimum, maximum, among others; NDVI's trend through the Mann Kendall test; correlation with PCG using the Pearson coefficient (*r*).

The results show that photosynthetic activity responds to the availability of water existing in the paramo, also showing a variability of the vigor of vegetation throughout its extent, resulting from the response to factors such as soil type, resilience of plant cover, geographical location, among others. There was no significantly strong correlation between PCG and NDVI ($r < 0.5$), however, it became clear that for the Multivariate ENSO Index (MEI) there is a rapid green greening in La Niña events, followed by a decrease in vigorousness over the years with El Niño events, mainly affecting short-term vegetation trends. While the Pacific Decadal Oscillation (PDO) recorded a relationship with ENOS, evidenced an intensification of El Niño (La Niña) events during a positive (negative) phase of the PDO, while a negative (positive) phase weakens it, affecting long-term trends in vegetation growth.

Keywords:

MODIS, vegetation, paramo NDVI, Global Climate Patterns

PRESENTACIÓN

Este estudio evalúa la dinámica espacio temporal de la vegetación del páramo ecuatorial a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), relacionándolo con Patrones Climáticos Globales (PCG) para un periodo de estudio comprendido entre el 2001 y 2018. Este trabajo se encuentra distribuido en seis capítulos, con el siguiente contenido:

El **Capítulo 1** muestra la introducción, los objetivos de estudio, la justificación y el alcance que se plantea desarrollar.

En el **Capítulo 2** se expone el estado del arte, en el cual se detallan los estudios que tuvieron mayor relevancia en el proceso de investigación bibliográfica.

El **Capítulo 3** desarrolla el marco teórico en donde se detallan conceptos fundamentales para la comprensión del estudio, así como la descripción general de la zona de estudio.

En el **Capítulo 4** se puede encontrar la metodología aplicada de manera detallada.

En el **Capítulo 5** se presenta los resultados obtenidos, así como la comparación de estos con resultados referidos por otras investigaciones.

Por último, en el **Capítulo 6** se expone las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el análisis del comportamiento de la vegetación espacial y temporal y de su relación con los patrones globales climáticos.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

El Ecuador es un país caracterizado por una variabilidad en el clima el cual, al estar ubicado en la latitud cero, es afectado continuamente por diferentes sistemas sinópticos que ocurren durante el año (Hidalgo & Proaño, 2017), tales como: el movimiento de la atmósfera y las masas de aire, las corrientes marinas (la corriente de El Niño y de Humbolt) y la cordillera andina (Rossel, 1997). Esta variabilidad en el clima tiene el potencial de influenciar en la agricultura, industria, producción de energía, salud, ecosistemas, etc. (Chen et al., 2012).

Uno de los ecosistemas que resulta incidido por esta variabilidad es el páramo. El páramo es un ecosistema ubicado entre los 3400 y 4500 msnm de los Andes, caracterizado por una lenta respuesta hidrológica y buena regulación del agua (Buytaert et al., 2006). Por años, ha sido fuente de recursos naturales y culturales tanto para las comunidades que habitan en su entorno, como para la población en general debido a los servicios ecosistémicos que ofrecen (Hofstede et al., 2014)

A pesar de su relevante importancia, los páramos ecuatorianos han sido poco estudiados a lo largo de los años. La información generada, por la red pluviométrica existente y modelos computacionales, es muy gruesa (Pourrut, 1995), impidiendo conocer los efectos de los patrones climáticos globales en secciones espaciales de tamaño más reducido, como los páramos, que permitan la toma de decisiones con respecto al manejo de los recursos naturales y a la resiliencia al cambio climático.

Sin embargo, en la actualidad es posible el uso de la teledetección o detección remota para obtener información relacionada. Una de las herramientas ampliamente usadas en esta área es el manejo de índices espectrales de vegetación o IV. Estos explotan el alto contraste entre la banda espectral del Rojo e Infrarrojo cercano, para caracterizar y diferenciar la vegetación de otros objetos terrestres (Paz Pellat et al., 2015). En la actualidad hay un gran número de IVs que utilizan este enfoque, uno de ellos es el Índice de Vegetación de Diferencia

Normalizada o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), el cual mide la capacidad fotosintética y la resistencia estomática de las plantas con respecto a la transmisión de vapor de agua. Por lo cual, altos valores de NDVI demuestran una mayor actividad de las plantas (Alatorre et al., 2010).

Esta investigación pretende generar información acerca del comportamiento de los páramos y su interacción con el clima, que pueda ser dispuesta en el futuro, de forma conjunta con otros estudios de cobertura vegetal y modelos de cambio climático. Se espera generar un estudio multitemporal a bajo costo tomando en cuenta las limitaciones del producto y hacer una representación de los eventos más relevantes suscitados en los últimos años. Además, que la metodología utilizada sirva como esquema para una investigación futura en relación al seguimiento y estudio de otros ecosistemas, viéndose favorecidas todas las entidades competentes en temas de conservación, planificación territorial y cambio climático ya que adquirirán un fortalecimiento de sus inventarios.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la dinámica espacio temporal del NDVI a través del producto MODIS (MOD13Q1) y relacionarla con patrones climáticos globales en el páramo ecuatorial para un periodo de estudio comprendido entre los años 2001 y 2018.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una base de datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del páramo entre el año 2001 y 2018 derivados del instrumento satelital MODIS
- Analizar la variabilidad temporal interanual e intra-anual del NDVI para los ecosistemas del páramo dentro del área de estudio.
- Examinar la variabilidad espacial del NDVI del páramo.
- Analizar la variabilidad espacio-temporal del NDVI del páramo.
- Determinar la correlación entre el NDVI y los patrones climáticos globales

1.3 HIPÓTESIS

Los índices espectrales de la vegetación del páramo tienden a responder fundamentalmente a la disponibilidad del agua, y, por lo tanto, constituyen como indicador de la disponibilidad temporal de agua en el suelo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los páramos, con una extensión que no supera el 5% del territorio en el Ecuador, son considerados como uno de los ecosistemas más relevantes a nivel nacional. Su importancia se puede evidenciar en varios campos de interés como la biología, hidrología o en el ámbito social y cultural (Mena et al., 2001). En relación al campo hidrológico, es reconocido por su buena regulación del agua. Esto se debe principalmente: al contenido de carbono orgánico, minerales en el suelo, altos depósitos de cenizas volcánicas (efecto sobre la porosidad del suelo), y a la vegetación del lugar (Buytaert et al., 2006). En conjunto, con las lluvias altas y bien distribuidas en el tiempo, dan como resultado páramos con propiedades hidrofísicas muy especiales (Buytaert et al., 2006).

En virtud de los beneficios que este ecosistema aporta a la sociedad, es de vital interés su estudio. Por lo cual surge la necesidad de encontrar herramientas y formular metodologías que ayuden a comprender el comportamiento de los páramos. Tal es el caso de los sensores remotos e imágenes satelitales. El sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) es una herramienta alojada en los satélites TERRA y AQUA que permite capturar hasta 36 bandas del espectro electromagnético, que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico (Bravo, 2017), permitiendo generar imágenes de la atmósfera, océano y superficie con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 metros. Los datos captados por el sensor, son procesados y almacenados en una serie de productos, para su posterior utilización (Bravo, 2017). Para la presente investigación se utilizará el producto MOD13Q1 que se encuentra relacionado con los índices de vegetación.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) es un indicador que permite conocer el comportamiento de la vegetación

ante variaciones climáticas. Ya que como menciona Mendoza (2016) la comprensión de la vigorosidad de la vegetación y su resiliencia, puede constituir un hito importante en condiciones de cambio climático. Además, la topografía de la Cordillera de los Andes en combinación con los ciclos climáticos, dan como resultado una variabilidad estacional compleja que es capturada por índices atmosféricos como el Índice ENOS Multivariante (MEI) o la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), los cuales afectan a la respuesta de la vegetación (Van Leeuwenet al., 2013). Por lo que, una mejor comprensión de la interacción vegetación-clima abordará los esfuerzos asociados con la adaptación a la variabilidad climática y temperaturas más cálidas, lo que tiene consecuencias para el funcionamiento del ecosistema, y uso de la tierra y agua en una variedad de formas (Van Leeuwenet al., 2013).

Esta metodología ha generado fructíferos resultados en varios lugares a nivel mundial y en varios campos de estudio, de acuerdo con la bibliografía estudiada (Alcaraz-Segura et al., 2008; Bravo, 2017; Gao et al., 2008; Maita, 2015; Millano y Paredes, 2016), logrando un monitoreo sistemático del área en cuestión y salvaguardando los servicios ecosistémicos que brinda a la humanidad. Por tanto, el presente estudio llenaría esos vacíos de información y evaluaría la exactitud del comportamiento de los páramos andinos ecuatorianos, ayudando así a un mejor control, toma de decisiones en materia de inversiones en conservación y desarrollo sostenible, y el seguimiento de sus impactos a largo plazo (Josse et al., 2013).

Adicionalmente, con este estudio se desea aumentar las bases de datos del comportamiento de los páramos y la correlación de estos con los índices globales a nivel nacional y hacer énfasis en la utilización de metodologías accesibles y diferentes para poder contrastar los resultados obtenidos con otros resultados. Siendo beneficiadas todas las entidades competentes en temas de conservación, planificación territorial y medidas contra el cambio climático puesto que tendrán un fortalecimiento en sus inventarios.

1.5 ALCANCE

El presente estudio permite aportar información relevante sobre el comportamiento de la vegetación de los páramos del Ecuador y los factores más importantes que causan su variabilidad. Para el estudio se dividirá a la serie de tiempo por ecosistemas y se utilizará estadística descriptiva para su análisis. Además, se relacionará linealmente al NDVI con ocho patrones climáticos globales (AAO, NAO, MEI, Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4, MJO y PDO) a través del coeficiente de correlación de Pearson. Se empleará herramientas de software apropiadas para el relleno de los datos y el cálculo de los coeficientes, además del análisis de la información obtenida y su validación con información bibliográfica existente. Esta metodología ha sido validada y usada en diferentes regiones del mundo, por lo que la información obtenida en este estudio será de importancia en futuras investigaciones a nivel nacional, necesario para la toma de decisiones en el mejoramiento de modelos predictivos y la conservación de zonas vulnerables.

CAPÍTULO 2

2 ESTADO DEL ARTE

En base a la bibliografía consultada se define que existe poco registro sobre la variabilidad espacial y temporal de la vegetación de los páramos en el Ecuador, así como la relación de esta con patrones climáticos globales. Sin embargo, existen ciertos estudios realizados tanto a nivel global y regional que han servido de apoyo para conocer lo que acontece localmente. Los documentos que se exponen a continuación han sido una de las herramientas más relevantes dentro de esta investigación.

2.1 ESTUDIOS REVISADOS SOBRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

2.1.1 NIVEL GLOBAL

2.1.1.1 Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión

Este trabajo de investigación fue elaborado por Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F. en 2008 y publicado en la revista Ecosistemas. Tiene como objetivo evaluar las variaciones anuales, estacionales, y cambios abruptos en la dinámica temporal de la vegetación, a través del NDVI, en tres zonas de estudio: las áreas protegidas de Sudamérica, los parques nacionales españoles, y dos parques naturales andaluces. Sus resultados mostraron tendencias significativas en el NDVI para las áreas protegidas de Sudamérica y la variación en magnitud y sentido para los parques nacionales de España de acuerdo a su situación geopolítica y biogeográfica. Mientras que los parques naturales andaluces mostraron una variabilidad en la dinámica temporal a causa de sus manejos históricos. En conjunto, reflejan que las políticas de conservación de la biodiversidad deberían plantearse de acuerdo al comportamiento y funcionamiento de cada ecosistema y no agruparlos de manera generalizada para su protección (Alcaraz-Segura et al., 2008).

2.1.2 NIVEL REGIONAL

2.1.2.1 Variabilidad de la vegetación con el índice de diferencia normalizada (NDVI) en Latinoamérica

Jorge Millano y Franklin Paredes en 2016 publicaron este artículo científico en la revista Novum Scientiarum. Tiene como objetivo la evaluación de la vegetación en el centro y sur de América, mediante series de tiempo de NDVI, que permitan conocer su comportamiento y el manejo de estos ecosistemas ante eventos como sequías, inundaciones, incendios forestales o deforestación. Esta información fue elaborada mediante recopilación e interpretación bibliográfica existente, con lo cual obtuvieron que la dinámica de la vegetación a partir de series temporales del NDVI ha tomado gran importancia en los últimos años con respecto al manejo de la cobertura vegetal y a la modelación del clima en diversas regiones de Latinoamérica (Millano y Paredes, 2016).

2.1.3 NIVEL LOCAL

2.1.3.1 Dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador.

Es un estudio de pregrado elaborado en la Universidad de Azuay por Juan Maita en 2015. Tiene como objetivo evaluar la variabilidad tanto espacial como temporal de los ecosistemas del sur del Ecuador a partir del Índice de Vegetación Mejorado o Enhanced Vegetation Index (EVI), a través de imágenes satelitales del sensor MODIS. Además, la correlación del NDVI con datos de temperatura y precipitación para el periodo 2000–2014, obteniendo como resultado un cambio negativo estadísticamente significativo ($p < 0.05$) del EVI en 7 ecosistemas. El ecosistema con mayor cambio negativo fue el Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01) presentándose en el 75% de su superficie; mientras que el mayor cambio positivo se observó para el ecosistema Intervención en el 8.2% de su área, señalando así una disminución de los ecosistemas naturales debido al incremento de las actividades humanas (Maita, 2015).

2.1.3.2 Análisis de la dinámica temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los años 1986, 2001 y 2017 en la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, Imbabura, mediante el uso de Google Earth Engine

Esta investigación es un trabajo de Pregrado de Angélica Aldás para la obtención del título de Ingeniera en Geografía y Gestión Ambiental en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador para el año 2019. En este trabajo se evaluó la dinámica temporal de la cobertura vegetal de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, con el propósito de observar la eficiencia de conservación de la Reserva ante posibles impactos antrópicos. Para ello, se utilizó 3 series temporales de NDVI a partir de imágenes Landsat TM y OLI para el periodo del 1986-2017 mediante el uso de Google Earth Engine. Los resultados muestran valores de NDVI más altos en el primer período de tiempo estudiado, mientras que con el paso de los años los valores siguientes mostraron un incremento en el estrés de la vegetación dejando al descubierto áreas con intensos procesos de deforestación y transformación de la cobertura vegetal natural en áreas dedicadas a actividades agropecuarias (Aldás, 2019).

2.1.3.3 Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático

Este trabajo fue elaborado en 2018 por Pamela A. Paula, Luis Zambrano y Paulina Paula. Tiene como objetivo la detección del estado de conservación de la vegetación para los año 1962–1966 hasta el año 2010, mediante el uso de imágenes satelitales LANDSAT 5, LANDSAT 7, ortofotos y fotografías aéreas. Para ello fue necesario el uso de una clasificación supervisada y el cálculo del NDVI. Esta investigación obtuvo principalmente como resultado que la vegetación nativa ha disminuido hasta a un 9.54% y la nieve a un 4.46%, a causa de la intervención de los mismos por actividades antrópicas (Paula et al., 2018).

2.2 ESTUDIOS REVISADOS SOBRE PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES

2.2.1 NIVEL GLOBAL

2.2.1.1 Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall

Este trabajo de investigación fue elaborado por Alexis Donald, Holger Meinke Brendan Power Aline de H. N. Maia Matthew C. Wheeler Neil White Roger C. Stone Joachim Ribbe en 2006 y publicado por la revista Geophysical Research Letters. Estos autores estudiaron el comportamiento de Oscilación Madden-Julian (MJO) determinando su influencia en los patrones de lluvia diarios, incluso en latitudes más altas, por medio de teleconexiones con patrones de presión media del nivel del mar (PNM media) a gran escala. Estos estados meteorológicos proporcionan una base mecanicista para una capacidad de predicción basada en MJO, mejorando significativamente la gestión de sistemas sensibles al clima, como la agricultura (Donald et al., 2006).

2.2.1.2 Investigating the impacts of the North Atlantic Oscillation on global vegetation changes by a remotely sensed vegetation index

Esta investigación, realizada en el 2012 por Li, A., Liang, S., Wang, A., & Huang, C. y publicada en la revista International Journal of Remote Sensing, exploró las respuestas globales de la vegetación (NDVI) a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) para los años entre 1982-2006 a través de correlaciones cruzadas. Los resultados revelaron que las regiones correlacionadas entre NAO y NDVI se concentran en las áreas de latitud media y alta del hemisferio norte, la zona africana alrededor de la banda N15°, así como las regiones S10-30° del hemisferio sur. Además que las respuestas de la vegetación a NAO se encuentran en todo el hemisferio sur, con varios retrasos de tiempo en diferentes regiones, a veces incluso durante un año y medio. Esto favorece en la predicción de la producción de cultivos y la gestión de los recursos hídricos y agrícolas en las regiones relacionadas con el NAO, así como información útil para la modelización mundial del ciclo del carbono terrestre (Li et al., 2012).

2.2.2 NIVEL REGIONAL

2.2.2.1 Influence of the Madden Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America

Esta investigación fue realizada por Álvarez, M.S., Vera, C.S., Kiladis, G.N. y Liebmann, B. en 2016. Su objetivo fue determinar la influencia de la oscilación Madden-Julian (MJO) en América del Sur. Para ello, se relacionaron anomalías de circulación, temperatura y mapas de probabilidad de lluvia con la fase del MJO, con lo cual determinaron su influencia en las escalas regionales junto con marcadas variaciones estacionales (DEF, MAM, JJA, SON) en diferentes partes del continente. Añadiendo que estas señales se originan principalmente a través de la propagación de la energía de onda Rossby generada en la región de calentamiento anómalo asociado con el MJO (Álvarez et al., 2016).

2.2.2.2 Present-day South American climate

Este documento publicado por René D. Garreauda, Mathias Vuille, Rosa Compagnucci y José Marengo en 2009 por la revista Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, registra las principales características de la variabilidad climática sobre América del Sur, a través de observaciones instrumentales reunidas durante el siglo XX. Se obtuvo que la circulación de los patrones de precipitación, temperatura y viento se ven influenciados por la cordillera de los Andes, las condiciones oceánicas contrastantes y la distribución de la masa terrestre. Del mismo modo, la intensidad y el momento de las fluctuaciones climáticas interanuales e interdecadales presentan una dependencia geográfica considerable, ya que algunas regiones están más influenciadas por fenómenos a gran escala arraigados en los océanos tropicales, mientras que otras están más influenciadas por fenómenos de alta latitud (Garreauda et al., 2009).

2.2.2.3 Influencia de fenómenos macroclimaticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos

Este trabajo de investigación elaborado por Germán Poveda, Jaime I. Vélez, Oscar Mesa, Carlos D. Hoyos, Luis F. Salazar, J Freddy Mejía, Olga J. Barco, Paula L. Correa y publicado en 2002 por la revista de Meteorología Colombiana tiene como objetivo el estudio de la influencia de patrones climáticos globales (ENOS, NAO, SOI, PDO, entre otros) sobre la variabilidad mensual, anual e interanual de

la hidrología de Colombia. Este trabajo confirma la existencia de correlaciones estadísticamente significativas con valores entre 0.6 y 0.65 para el índice SOI y caudales. Mientras que con el PDO se observan correlaciones estadísticamente significativas menores a -0.5. (Poveda et al., 2002).

2.2.3 NIVEL LOCAL

2.2.3.1 Exploración de redes bayesianas para detectar relaciones entre la precipitación del Ecuador y teleconexiones climáticas

Este trabajo de titulación, elaborado por Paúl Ávila en 2019 para la obtención del título de Ingeniería en Sistemas y Telemática en la Universidad de Azuay, tiene como objeto explorar las relaciones entre la precipitación en el Ecuador continental e índices climáticos a través de redes bayesianas. Se empleó datos de precipitación y regiones de estacionalidad de precipitación para el aprendizaje de la red bayesiana en R y señaló que las predicciones fiables de precipitación requieren de la comprensión de las teleconexiones climáticas sobre la precipitación, añadiendo que en el Ecuador, estas teleconexiones han sido estudiadas con métodos de correlación, careciendo de estudios multivariados con varios índices climáticos simultáneamente (Ávila, 2019).

2.2.3.2 Influencia de los patrones climáticos globales en la variabilidad del clima durante el período 2000-2016 en los páramos del norte de Ecuador

Esta investigación es una Tesis de Pregrado para obtener el título de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de Lenin Ramírez y Brian Vallejo en 2018. El objetivo de este estudio fue la evaluación del comportamiento del páramo ubicado al norte de Ecuador, a partir del Índice de Vegetación Mejorado (EVI); y su respuesta en función de índices climáticos globales como El ENOS para el período 2000-2016. Se obtuvo como resultado la evidencia de un gran impacto de este fenómeno en los páramos que varía de acuerdo a cada ecosistema en estudio. Además, una correlación estadísticamente significativa baja entre el índice MEI y EVI y moderada entre el MEI y la precipitación, reflejando sus valores máximos entre los períodos 2008-2009 y 2012 (Vallejo y Ramírez, 2018).

2.2.3.3 Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011)

Este estudio fue publicado por Enrique Morán-Tejeda Juan Bazo Juan I. López-Moreno Enric Aguilar César Azorín-Molina Arturo Sanchez-Lorenzo

Rodney Martínez Juan J. Nieto Raúl Mejía Natalia Martín-Hernández Sergio M. Vicente-Serrano en 2016 por International Journal of Climatology. Su objetivo fue identificar tendencias climáticas y su variabilidad a partir de la precipitación y temperatura en Ecuador y sus vínculos con el ENOS (El Niño 1+2 y El Niño 3.4) para el período 1966-2011; obteniendo como resultado un aumento de las precipitaciones y una señal de influencia de El Niño 3.4 para la región Sierra. Las temperaturas fueron espacialmente homogéneas, mostrando una tendencia de calentamiento intenso, mientras que la influencia de El Niño 1+2 en la temperatura fue grande de enero a julio, evidenciando así el estrecho control ejercido por el ENOS, así como la ocurrencia de un calentamiento significativo en todo el país independiente del fenómeno ENOS (Morán-Tejeda, 2016).

CAPÍTULO 3

3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone una breve recolección bibliográfica que engloba los conceptos principales concernientes al tema de investigación.

3.1 TELEDETECCIÓN

Es el proceso en que se obtiene información de un objeto de la superficie terrestre mediante la energía transmitida o emitida por dicho cuerpo sin necesidad de entrar en contacto con el mismo. Para ello es necesario el empleo de instrumentos tales como los sensores remotos (Araya, 2009).

3.1.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético es el sistema que clasifica, a través de bandas, toda la energía que se desplaza armónicamente a la velocidad de la luz, considerando su longitud de onda y frecuencia (NASA, 2011). La organización de estas bandas comprende desde las longitudes de onda más cortas como los rayos gamma, hasta las más largas como las ondas de radio (Figura 3.1, Chuvieco, 2008).

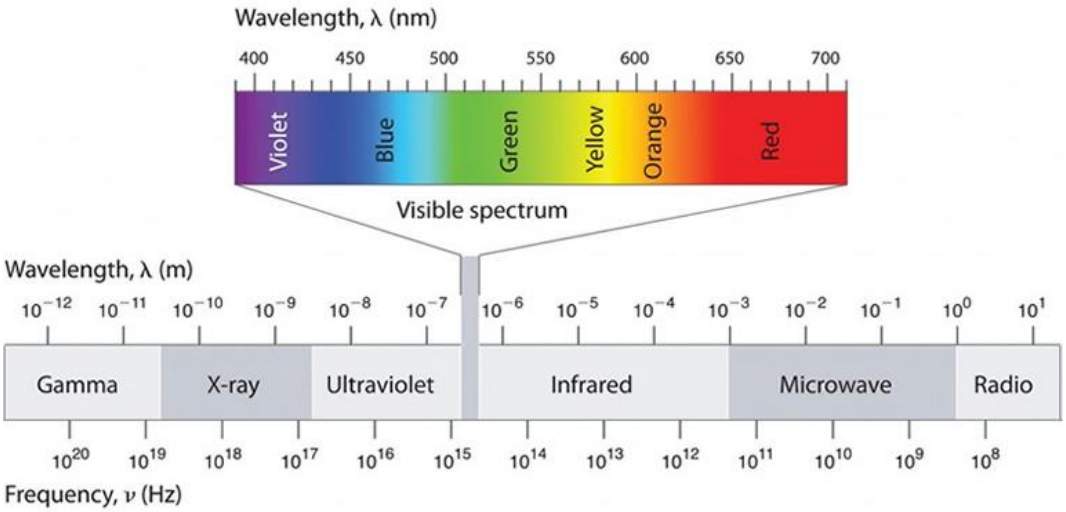


Figura 3.1. Diagrama del espectro electromagnético.

Fuente: (Mantto Telecom, 2017)

3.1.2 SENSORES REMOTOS

Son sensores empleados en la teledetección. Registran la cantidad de radiación electromagnética reflejada por los cuerpos de la superficie de la Tierra, discriminando regiones espectrales determinadas de acuerdo al sensor empleado (Chuvieco, 2008), para finalmente generar una imagen. Cada objeto en la superficie o fenómeno atmosférico refleja o emite una porción de energía dentro del espectro electromagnético que va de acuerdo a su composición y a la radiación que percibe (Chuvieco, 2008).

Se clasifican de acuerdo a la fuente de energía que puede ser externa, por la radiación solar, o intrínseca, por un radar. Los de fuente externa o sensores pasivos (Figura 3.2) son aquellos que registran la luz solar reflejada (ópticos) y la temperatura emitida (térmicos) de la superficie terrestre (Bravo, 2017). Las imágenes obtenidas son fáciles de utilizar e interpretar, sin embargo, pueden verse afectadas por la nubosidad. En contraste, los de fuente intrínseca o sensores activos (Figura 3.2) transmiten sus propios pulsos de energía y miden el tiempo de propagación y la intensidad del pulso que es enviado de vuelta al sensor por la superficie (Bravo, 2017). Estos sensores son costosos, pero pueden atravesar nubes y doseles densos, proporcionando mayor información (Green, 2000).

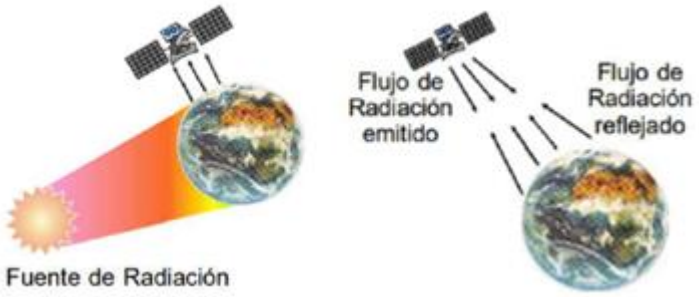


Figura 3.2. Sensores remotos activos y pasivos.
Fuente: (Bravo, 2017)

Para ambos casos, al momento de la captación de información es preciso considerar aspectos inherentes al sensor, tales como el ángulo de iluminación, el relieve, las variaciones medioambientales en la cubierta y el ángulo de observación que difieren en cada punto de la imagen, afectando la información obtenida (Chuvieco, 2008).

RESOLUCIÓN

Cuando se utilizan sensores remotos, es fundamental conocer su resolución espacial y temporal.

Resolución espacial

Es la unidad mínima de información incorporada en una imagen, denominada píxel, que representa la longitud de un lado de un cuadrado. La resolución de una imagen es un indicador de su nivel posible de detalle, por lo que, una mayor resolución se obtendría con una mayor cantidad de pixeles de un mismo objeto, siendo estos de menor tamaño, con lo cual se tendría más detalle de los objetos (Bravo, 2017).

Resolución temporal

La NASA (2011) menciona que “la resolución temporal es el tiempo necesario para volver a visitar la misma zona de la Tierra”. Su resolución temporal puede ser de varios tipos:

- Alta resolución: entre 1 y 3 días
- Media resolución: entre 4 y 16 días
- Baja resolución: mayor a 16 días

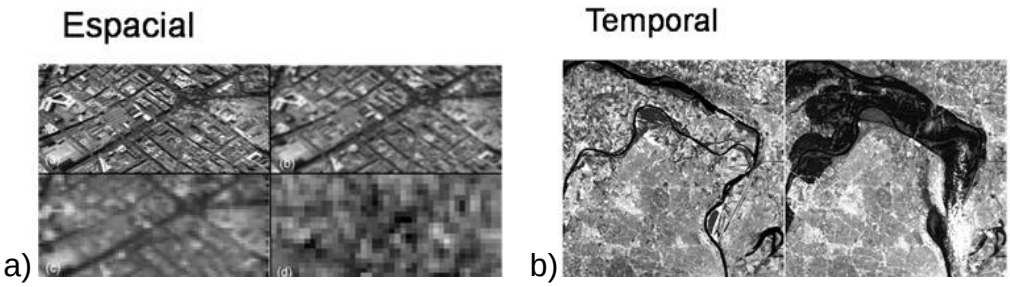


Figura 3.3. Diferentes tipos de resolución en teledetección.
Resolución espacial (a) y resolución temporal (b). Fuente: (Chuvieco, 2008).

DATOS DISPONIBLES

Muchos países han puesto en órbita satélites con instrumentos usados para monitorear la superficie de la Tierra desde la década de 1970, lo que ha creado un

enorme archivo de datos. Sin embargo, muchos de estos son de baja resolución o no son accesibles al público en general, lo cual dificulta su uso (Green, 2000). En la actualidad, uno de los sensores más utilizados y de acceso libre es el sensor MODIS.

MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor ubicado en los satélites TERRA y AQUA parte de la misión EOS (Earth Observing System) de la NASA. Permite la captura de hasta 36 bandas espectrales, desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico, para la generación de imágenes superficiales, atmosféricas y oceánicas (Bravo, 2017). Estas se constituyen en tres productos fundamentales (MOD. 01 al 03). Estos a su vez, generan una serie de productos que se agrupan de acuerdo con al objeto de interés (Bravo, 2017). El producto MOD13, con una resolución espacial y temporal de 250m y 16 días respectivamente, relaciona los índices de vegetación, proporcionando un valor por píxel. Este valor es seleccionado por el producto mediante criterios de valores máximos entre los 16 días de toma de datos, nubosidad y ángulo de visión (Bravo, 2017).

3.1.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El Índice de vegetación normalizada o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) es un índice usado en la estimación de la abundancia, condición, estado y desarrollo de la vegetación en función de la intensidad de reflectancia de del rojo y del infrarrojo cercano que la vegetación puede emitir (Figura 3.4, Sánchez García & Toral Ruiz, 2016).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Figura 3.4. Fórmula para el cálculo de NDVI.
Banda del Rojo (Red) y del Infrarrojo Cercano (NIR). Fuente: (GIS Geography, 2020a)

Las moléculas de clorofila de la planta absorben, alrededor de un 70% a 90%, la luz roja y azul de la radiación solar para ser usadas en la fotosíntesis. Mientras que la luz verde es mucho más reflejada (Figura 3.5), por lo que el

observador humano, que puede captar sólo una porción de todo el espectro electromagnético (espectro visible), lo percibe como vegetación viva (Bravo, 2017). Algo similar ocurre con la energía infrarroja (Figura 3.6), ya que es mayormente esparcida por la planta pero en mayor cantidad, por lo que es esta banda la usada principalmente en el estudio de la vegetación (Bravo, 2017).

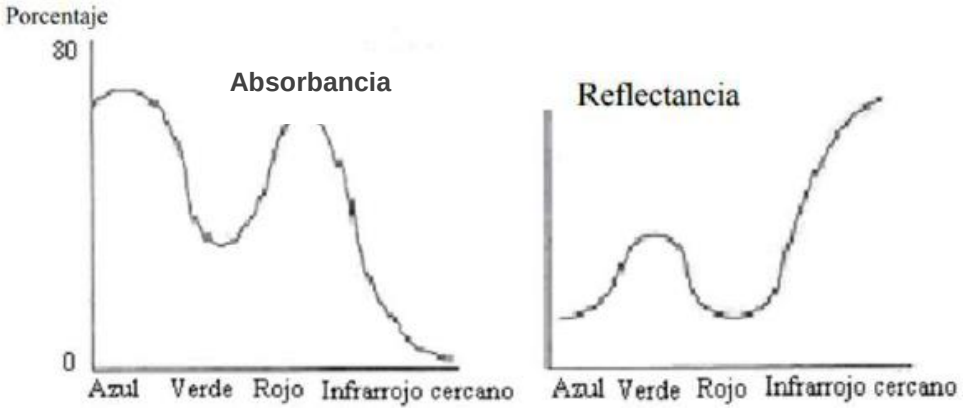


Figura 3.5. Espectro de absorción y reflectancia de una planta.
Fuente: (Bravo, 2017)

Por tal, las bandas del Rojo (Red, Figura 3.4) y del Infrarrojo Cercano (NIR, Figura 3.4) son las más relacionadas a diferentes parámetros relativos a la cobertura vegetal, tales como vigorosidad y cantidad de clorofila (Sánchez García & Toral Ruiz, 2016). Por lo que, si en un suelo desnudo se desarrolla la vegetación, disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta la del infrarrojo, brindando una idea aproximada de la vitalidad y la densidad de la vegetación en un píxel (Almeida, 2015).

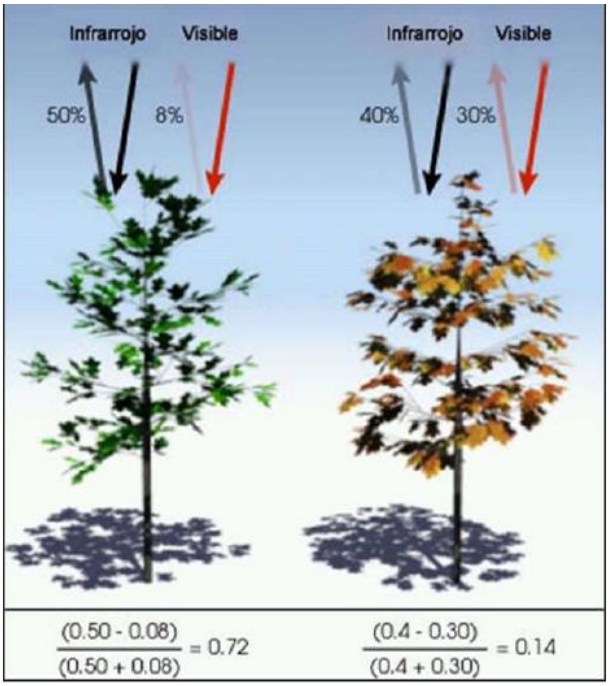


Figura 3.6. Reflectancia del rojo e infrarrojo en la vegetación.
Fuente: (Bravo, 2017)

Este índice fue desarrollado para la medición de la abundancia y condición de la cobertura vegetal sobre el suelo (Millano & Paredes, 2016). Los valores crudos de NDVI disponen de un rango de variación que va desde (–1) a (+1), permitiendo el establecimiento de umbrales y la comparación de imágenes (Muñoz, 2013).

Tabla 3.1. Clasificación referencial de los valores crudos de NDVI.

VALOR NDVI	REPRESENTACIÓN
<0	Nubes, agua y nieve
0 – 0,2	Suelo sin vegetación, rocas o arena
0,2 – 0,4	Vegetación débil o escasa
0,4 – 1	Vegetación densa o vigorosa

Fuente: Merg, et al., 2011. Modificado por: Uvidia Karla, 2020

A diferencia de otros índices de vegetación, el NDVI posee una gran sencillez en el cálculo y el análisis de las variables biofísicas correspondientes a la cobertura vegetal. Además de la comparabilidad de resultados obtenidos por diferentes

investigadores. Sin embargo, este índice posee una baja capacidad de restricción de la influencia del suelo desnudo y de la atmósfera (Merg, et. al, 2011). A pesar de ello, el NDVI ha sido usado extensivamente en estudios de pequeña y gran escala debido a su fácil interpretabilidad. Dichos estudios han permitido comprender el estado de la vegetación, detectando fenómenos de amplio rango de acción (Millano & Paredes, 2016).

3.2 CLIMA

El clima es el estado o descripción estadística de las condiciones meteorológicas (temperatura, lluvia, humedad, viento, nubosidad, masas de aire frío, etc.) más frecuentes de una región en un periodo de tiempo (al menos tres décadas) (OMM, 2013). Este se diferencia del tiempo meteorológico el cual hace referencia a las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas del planeta (Conde, 2006). Existen varios factores que condicionan el clima de una región los cuales se mencionan a continuación.

3.2.1 FACTORES CONDICIONANTES

3.2.1.1 Corrientes Marinas

Son flujos de agua que circulan por las cuencas oceánicas recorriendo miles de kilómetros. Con un color ligeramente distinto al de las aguas circundantes, debido a diferencias en la temperatura y salinidad, permiten la distribución de las aguas calientes y frías a nivel mundial (Coello, 2012). Estas corrientes son originadas principalmente por la rotación del planeta, que desvía el curso del flujo de agua, y la acción del Sol que calienta la Tierra de manera diferente en función de la latitud (Coello, 2012).

En el Ecuador, las corrientes marinas que influyen en el clima son la de Humboldt (corriente fría) y la del Niño (corriente cálida, figura 3.7). La corriente fría de Humboldt proviene de la Antártica y recorre las costas sudamericanas, para luego desviarse frente a las costas de Manabí, hacia las Islas Galápagos. Debido a la baja evaporación del agua fría, genera aridez en la región Costa (Barros y Troncoso, 2010). La corriente cálida del Niño proviene del Golfo de Panamá y

predomina a la de Humboldt entre diciembre y abril, dando inicio a la estación cálida y húmeda en la región costa. Sin embargo, en ciclos de 3 a 7 años, sus efectos se intensifican generando el fenómeno de El Niño (La Niña) que incrementa (disminuye) las lluvias en el Ecuador durante los primeros meses del año (Barros y Troncoso, 2010).

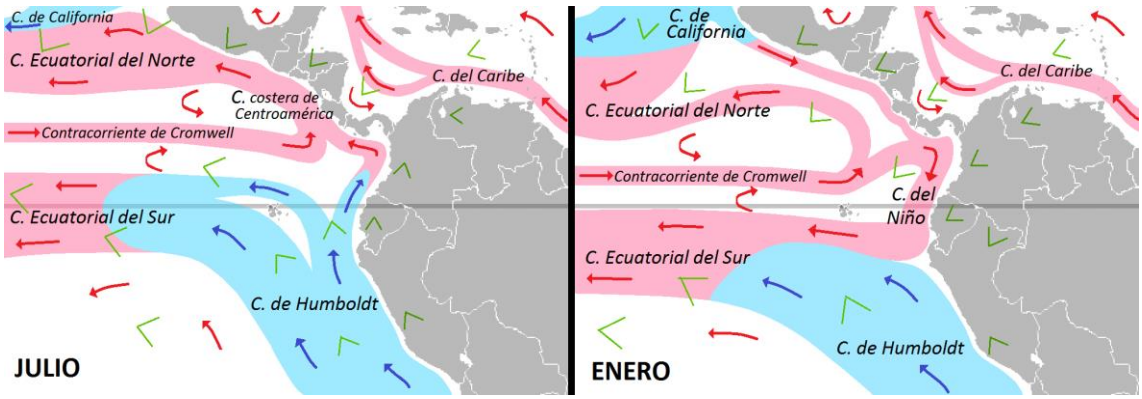


Figura 3.7. Interacción de corrientes marinas en las costas este del Pacífico. Las corrientes de color rojo (azul) pertenecen a corrientes marinas cálidas (frías). La figura del lado derecho muestra las corrientes marinas presentes en el verano austral y en la figura del lado izquierda las corrientes presentes en el invierno austral. Fuente: (Varela y Ron, 2018).

3.2.1.2 Patrones de Vientos Globales

El viento es una masa de aire que se desplaza de zonas de alta presión a zonas de baja presión atmosférica. Los patrones de vientos globales se ven influenciados por factores como la rotación de la Tierra, que da lugar al efecto Coriolis. Este efecto actúa sobre las masas de aire generando rotaciones en sentido anti-horario en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur (Lutgens y Tarbuck, 2000). Otro factor importante es la influencia del calentamiento de las corrientes marinas y la captura atmosférica del calor solar. Y por último, las celdas de convección (Figura 3.8) que crean gradientes de baja presión en la zona ecuatorial, altas presiones a 30° norte y sur, baja presión a 60° al norte y sur, y alta presión en los polos. (Lutgens y Tarbuck, 2000).

Por ejemplo, en la zona ecuatorial, la intensa radiación solar que se produce a lo largo del día genera que las masas de agua se evaporen y las masas de aire húmedo asciendan y generen lluvia al enfriarse. Esto ocasiona alta precipitación y

baja presión atmosférica en la región de la línea ecuatorial (Schneider, 2006). El aire, luego de perder su humedad, se mueve hacia latitudes mayores al norte y sur, para luego descender en zonas subtropicales. Finalmente, el aire regresa hacia la zona ecuatorial a baja elevación capturando humedad en donde se reinicia este ciclo (Schneider, 2006).

El lugar de convergencia entre vientos del hemisferio norte y hemisferio sur se conoce como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Figura 3.8). Al calentarse más fácilmente la componente terrestre que la componente oceánica, la ZCIT alcanza mayores latitudes durante el verano austral y verano boreal (Pourrut, 1985). Es decir, ZCIT se mueve siguiendo el calor a lo largo del año, lo que genera la estacionalidad de la lluvia en el Ecuador. Por ejemplo, durante el mes de julio, la ZCIT se mueve hacia Centroamérica generando condiciones secas en la Costa y Sierra del Ecuador. Mientras que en el mes de enero la ZCIT retorna al Ecuador trayendo lluvias (Pourrut, 1985) generando un ciclo bimodal de la precipitación en la serranía.

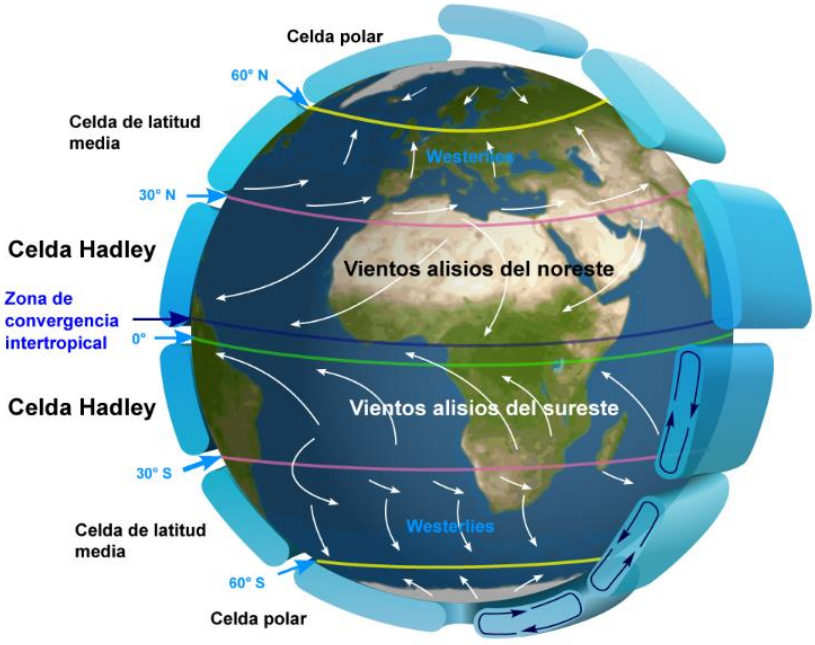


Figura 3.8. Patrones de movimiento de masas de aire provenientes de norte y sur, con respecto a la línea ecuatorial.

Fuente: (Varela y Ron, 2018)

3.2.1.3 Topografía

La topografía es un factor de gran relevancia en el clima. Las cordilleras influyen notablemente sobre el clima al crear barreras que impiden el desplazamiento de masas de aire (Ricarde, 2019). Otras características topográficas como los cañones, canalizan y amplifican los vientos. Mientras que las montañas y las mesetas se encuentran expuestas a temperaturas frías de acuerdo a la altitud en la que se encuentre, tendiendo así una relación inversa entre la altitud y la temperatura del lugar (Ricarde, 2019).

El clima del Ecuador se encuentra muy influenciado por la topografía de la zona, esto debido a la Cordillera de los Andes que atraviesa de norte a sur el país (Figura 3.9). Esta se divide en dos cordilleras principales: Occidental y Oriental. Hacia la cordillera Occidental se puede encontrar tierras bajas que limitan con el Océano Pacífico. Mientras que hacia la cordillera Oriental existen tierras bajas conectadas a la llanura amazónica. Estas cordilleras están unidas entre sí por una serie de nudos transversales que acotan los valles interandinos (Duellman, 1979).

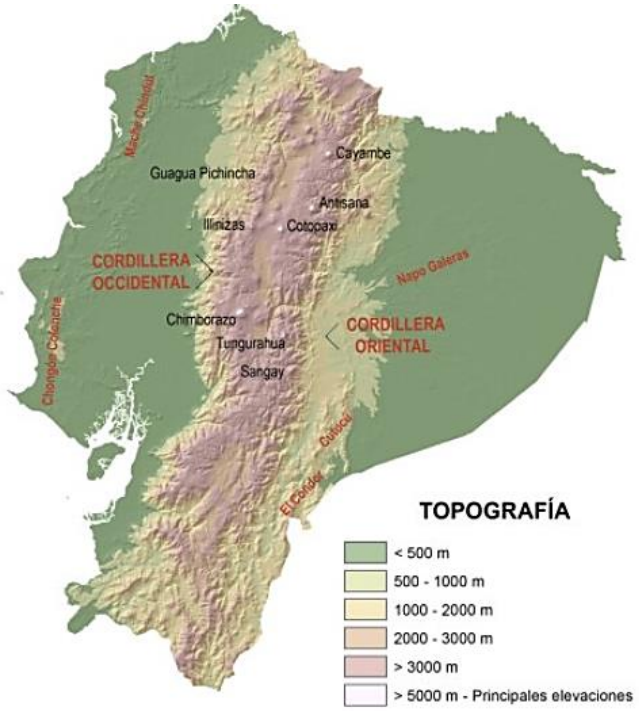


Figura 3.9. Mapa topográfico representando las principales cordilleras y elevaciones del Ecuador. Fuente: (Instituto Geográfico Militar, 2019).

Las dos cordilleras alcanzan altitudes por sobre los 5000 m. Este rango altitudinal (de 0 a 6300 m) influye en el gradiente de temperaturas, que oscilan entre 0 y 26°C, y en la cantidad de lluvia que se genera ya que el aire frío tiene poca capacidad de retención de humedad (Varela y Ron, 2018). En consecuencia, las zonas altas, como los páramos, tienen poca precipitación. Mientras que las zonas bajas presentan amplia variación en la cantidad de lluvia que reciben a lo largo del año, como es el caso de los bosques andinos y de tierras bajas (Varela y Ron, 2018).

3.2.2 PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES (PCG)

Un índice o patrón climático global (PCG) es un valor usado en la descripción de la situación actual y las posibles alteraciones en el tiempo del sistema climático. A diferencia del estado del tiempo, que puede cambiar bruscamente a diario, los cambios en el clima se producen de manera más lenta, debido a que es un estado promedio de la atmósfera en un periodo prolongado de tiempo, permitiendo realizar predicciones y modelamientos del clima (Jiménez, 2018).

Figura 3.10. Posición geográfica de los Patrones Climáticos Globales más utilizados a nivel mundial.

Fuente: Jiménez, 2018. Modificado por: (Uvidia Karla, 2020)

El cálculo de estos índices se desarrolla a través de ecuaciones que utilizan variables determinantes en el sistema climático. Estas pueden ser de carácter

atmosférico tales como la precipitación, presión, temperatura, y radiación solar, o de otro tipo, como la temperatura superficial del mar (TSM) o la cantidad de hielo (Jiménez, 2018). Estos patrones climáticos son de vital importancia en el análisis estadísticos (medias y valores extremos) de series de tiempo y sus posibles estimaciones o tendencias para un mejor entendimiento del comportamiento del clima a nivel global y local (Jiménez, 2018). Entre los modos de variabilidad climática más comunes tenemos:

3.2.2.1 Oscilación Antártica (AAO)

La Oscilación Antártica o Antarctic Oscillation (AAO), también conocida como Modo Anular del Sur (SAM) o Modo Anular del Hemisferio Sur (SHAM), ambas abreviaciones por sus siglas en inglés, es un índice de variabilidad atmosférica de baja frecuencia del Hemisferio Sur ocasionado por una diferencia de presión zonal entre las latitudes de 40°S y 65°S. El AAO describe el desplazamiento norte-sur (entre el polo sur y latitudes medias, Figura 3.11) del cinturón de vientos del oeste que circulan alrededor de la Antártida (Jiménez, 2018.). Esta Oscilación explica aproximadamente un 30% de la variabilidad climática, especialmente de la precipitación, de este Hemisferio con particular influencia en la región extratropical y latitudes altas (Marshall, 2018).

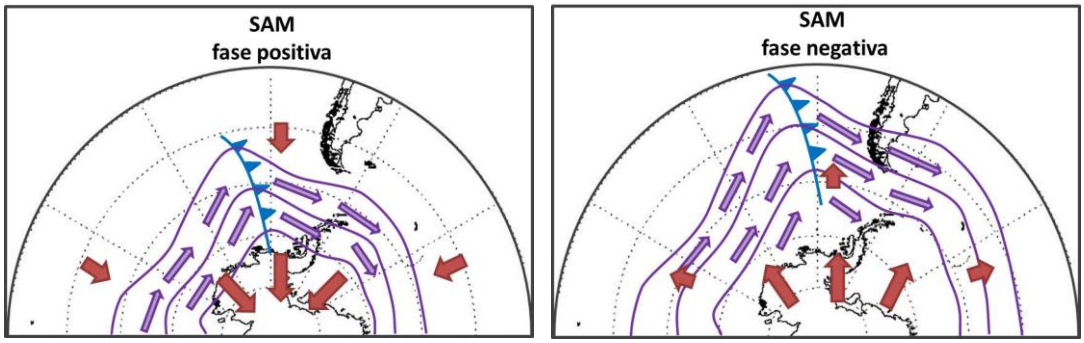


Figura 3.11. Fases de la Oscilación Antártica.
Fuente: (Meteorología de Buenos Aires, 2015)

En su fase positiva, el cinturón de vientos del oeste se debilita en las latitudes medias (30°S-50°S), mientras que en las latitudes medias-altas (50°S-70°S) se intensifica y se contrae hacia la Antártida actuando como barrera que impide que el aire cálido llegue al continente. Mientras que en la fase negativa sucede lo contrario (Figura 3.11, Thompson et al., 2017). Esto generalmente se produce en los meses

de diciembre a febrero, es decir, en las estaciones de verano del Hemisferio Sur, implicando un traslado de masa atmosférica y la variabilidad de la precipitación y temperatura entre el polo sur y latitudes altas y medias (Thompson et al., 2017 y Stella, 2018). En la figura 3.12 se observa que si bien existe una oscilación interanual del AAO (barras rojas y azules), también se observa una tendencia negativa (línea negra) desde 1955 hasta 1993 y a partir del año siguiente esta tendencia cambia a positiva hasta la actualidad. El índice AAO fue elaborado mediante la proyección de las anomalías de altura media mensuales de 700-hPa hacia el polo de 20°S sobre el patrón de carga del AAO, por medio del uso de la Función Empírica Ortogonal o Emperical Orthogonal Function (EOF) (Climate Prediction Center, 2015).

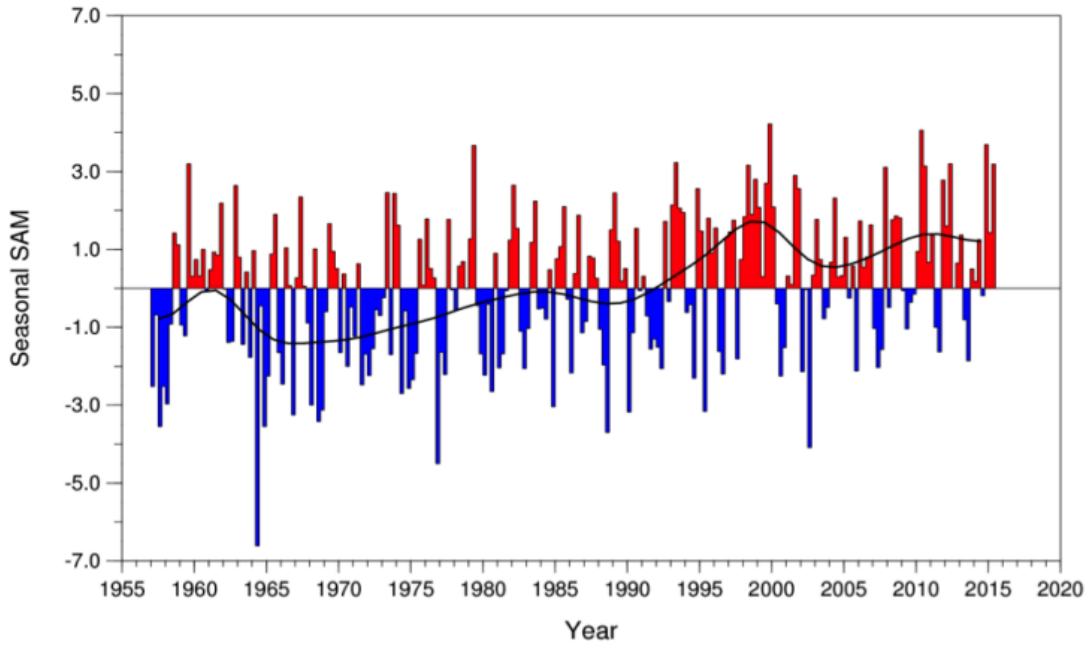


Figura 3.12. Anomalías del índice AAO.
La curva negra suave muestra variaciones decadales. Fuente: (Marshall, 2018)

3.2.2.2 El Niño, Oscilación del Sur (ENOS)

El Niño, Oscilación del Sur (ENOS) es un evento climático desarrollado en el Pacífico ecuatorial. Su fase cálida, conocida como El Niño, es producida por un incremento en la TSM y una reducción de los vientos alisios al este del océano Pacífico (Maturana et al., 1997). Estas anomalías ocasionan lluvias intensas en los países litorales del Pacífico sudoriental, así como en otras partes del mundo, y

períodos de sequía en Australia y zonas aledañas. En contraste, la fase fría de ENOS, conocida como La Niña, presenta TSM más frías que lo habitual y un incremento de los vientos alisios en el este del océano Pacífico lo que genera sequías en el Pacífico sudoriental e inundaciones en Australia (Maturana et al., 1997).

El ciclo del ENOS es irregular, oscilando su aparición aproximadamente entre 3 y 7 años (Kobayashi et al., 2015), y muy variable en su magnitud de un evento a otro. Estas variaciones fueron analizadas por Quinn y Neal (1992) clasificándolas como fuertes (anomalías mayores a 2), moderados (anomalías entre 1 y 1.5), débiles (anomalías entre 0.5 y 1) o muy débiles (anomalías menores a 0.5). Este puede persistir durante varias estaciones y, por lo tanto, producir graves efectos regionales, lo que lo convierte en uno de los principales predictores de las perturbaciones climáticas mundiales (Kobayashi et al., 2015).

Tabla 3.2. Eventos pasados del ENOS

EL NIÑO	NEUTRAL	LA NIÑA
2003	2001-2002	2008
2007	2004-2006	2011
2010	2009	2012
2016	2013-2014	2018

Los años se determinan a partir de los valores de diciembre, enero y febrero (DJF).
Fuente: NOAA, 2017. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Se dice que se produjo El Niño (La Niña) cuando la TSM se encuentra 0.5 °C por encima (debajo) de la media. Para una mejor comprensión de estas variaciones y sus efectos sobre el Pacífico ecuatorial, se han definido cuatro regiones de acción: Niño-1+2, Niño-3.4, Niño-3 y Niño-4 (Figura 3.13), siendo las dos primeras las más usadas para evaluar su comportamiento en la región ecuatoriana (Jiménez, 2018).

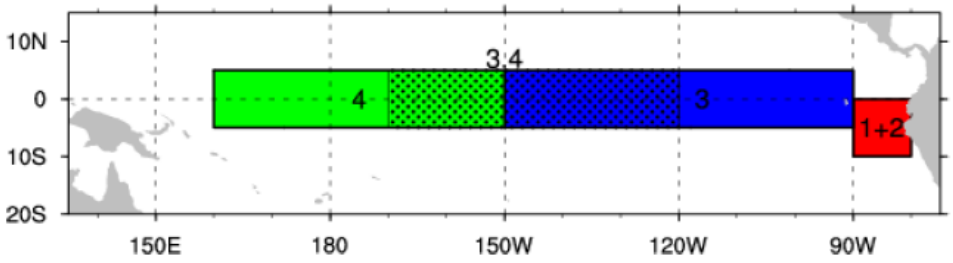


Figura 3.13. Definición de regiones El Niño 1+2, 3, 4 y 3.4 sobre el Pacífico ecuatorial.
Fuente: NOAA, 2017.

El índice de la oscilación de El Niño correspondiente a la región geográfica **Niño 1+2** (0°-10°S, 90°O-80°O) comprende como zonas de influencia a las costas de Ecuador, incluido el archipiélago, y de Perú. Este índice es utilizado como un indicador de las variaciones de la TSM producidas por ENOS en la costa del Pacifico sudamericano (Jiménez, 2008). Mientras que el índice correspondiente a la región **Niño 3.4** (5°N-5°S, 170°O-120°O) incluye parte de las regiones **Niño 3** (Pacifico oriental ecuatorial) **y Niño 4** (Pacifico occidental ecuatorial) y se caracteriza por reflejar las anomalías de TSM generadas en el Pacifico central ecuatorial (Jiménez, 2008).

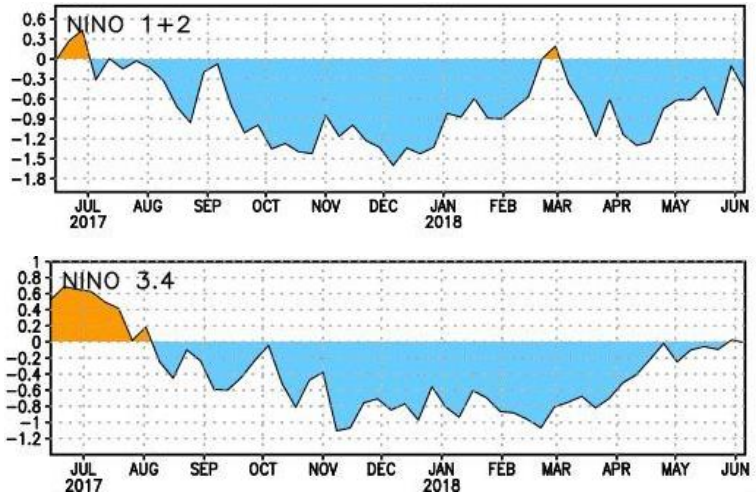


Figura 3.14. Variaciones de la TSM en la región Niño 1+2 y Niño 3.4.
Fuente: NOAA, 2017.

El Índice Multivariado de ENOS (**MEI**, por sus siglas en inglés) es un índice que combina variables oceánicas y atmosféricas, facilitando la evaluación del ENOS en un solo índice (Kobayashi et al., 2015). Dentro de las variables a utilizar se encuentran la presión del nivel del mar (PNM), la temperatura de la superficie del mar (TSM), los vientos zonales de la superficie (U), los vientos meridionales de la superficie (V) y Radiación de onda larga (ROL). Este índice permite adquirir indicaciones en tiempo real de la magnitud de ENOS y, por medio de análisis históricos, proporciona un entorno para un estudio comparativo significativo de las condiciones en evolución (Kobayashi et al., 2015). Generalmente, se emplea el MEI ya que abarca múltiples variables, brindando una descripción más amplia de las variaciones climáticas producidas que otros índices como el SOI u ONI (Wolter y Timlin, 2011).

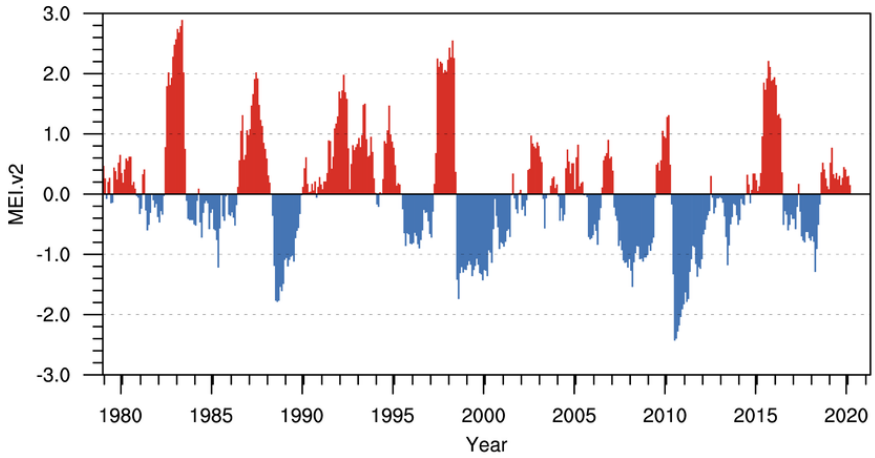


Figura 3.15. Anomalías del índice MEI.
La zona roja corresponde a eventos del Niño y la azul a la Niña. Fuente: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2017.

3.2.2.3 Oscilación del Atlántico Norte (NAO)

La Oscilación del Atlántico Norte o North Atlantic Oscillation (NAO) refleja las alteraciones atmosféricas, producidas principalmente en Norteamérica y Europa. El NAO es producido por la diferencia de presión atmosférica entre latitudes cercanas a Islandia y las islas de Azores (Jiménez, 2018). Este patrón de anomalías climáticas se ve más reflejado durante el invierno donde los patrones atmosféricos son más fuertes, variando generalmente de forma anual. Sin embargo existen

casos en los que ha permanecido en una fase determinada durante algunos años (Jiménez, 2018).

Si se tiene una presión más alta de lo normal en el Atlántico subtropical mientras que en Islandia una menor, se dice que el NAO se encuentra en una fase positiva. Gracias a esa diferencia, las tormentas invernales provenientes del océano Atlántico, se intensifican y su trayectoria se ubica más al norte que durante la fase negativa. Dando como resultado que el invierno sea más cálido y húmedo en Europa, más frío y seco en el norte de Canadá y Groenlandia, y más templado y húmedo en las costas este de Estados Unidos (Jiménez, 2018). En contraste, si la diferencia de presión en estos dos puntos es baja, se habla de una fase negativa. Esto genera que las tormentas invernales con dirección de oeste a este se vean debilitadas, arrastrando aire húmedo hacia el Mediterráneo y aire frío hacia el norte de Europa, mientras que en las costas este de Estados Unidos se producen más ráfagas de aire frío y nevadas (Jiménez, 2018).

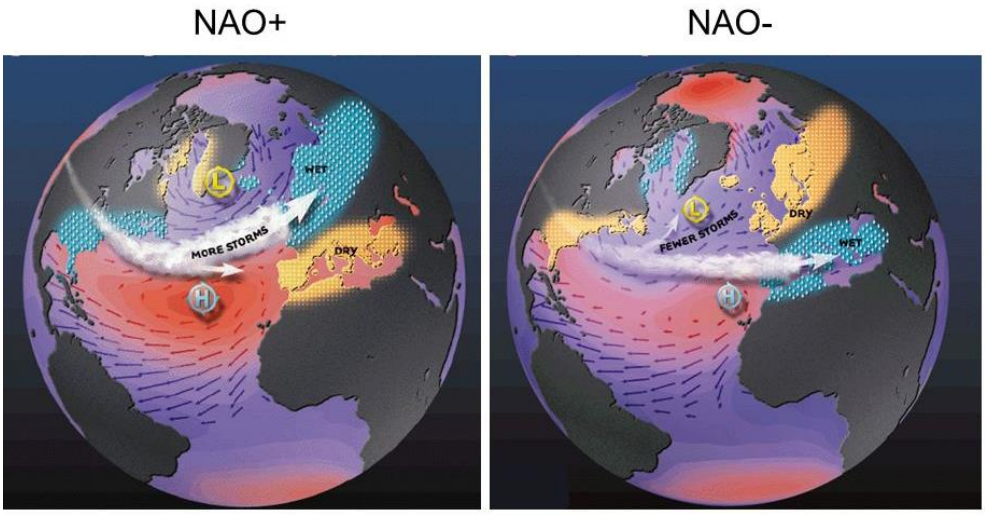


Figura 3.16. Variación en la presión atmosférica del índice NAO.
Fuente: http://www.ideo.columbia.edu/NAO

Si bien el NAO afecta directamente a este zona del globo, se ha observado su influencia en otras zonas como las costas de la India y el Océano Pacífico, debido a las teleconexiones que este índice posee con otros fenómenos como el ENOS (Sánchez-Santillán et al., 2006). A grandes rasgos, el índice utiliza los valores de la diferencia entre las anomalías normalizadas de la PNM en localidades

representativas de Azores e Islandia, y las anomalías globales de la temperatura superficial de años anteriores para construir las series de tiempo (Jiménez, 2018).

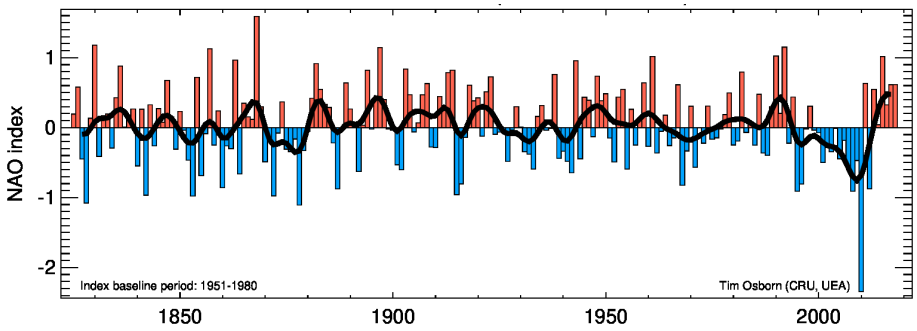


Figura 3.17 Anomalías del índice NAO.

La curva de color negro corresponde a variaciones decadales. Fuente: (UEA, 2018).

3.2.2.4 Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico o Pacific Decadal Oscillation (PDO) es un patrón de variabilidad climática en la cuenca del Pacífico, similar al ENOS (Zhang et al. 1997) pero con una mayor durabilidad. Esta oscilación posee dos fases extremas, cálidas y frías, de acuerdo a las anomalías de la TSM entre el noreste y el Pacífico tropical. Cuando las TSM se encuentran predominantemente frías en el Pacífico norte interior y cálidas a lo largo de la costa del Pacífico, formando una especie de herradura (Figura 3.18), y además, si las presiones del nivel del mar se encuentran por debajo del promedio sobre el Pacífico norte, se dice que la PDO está en su fase positiva. Mientras que si estos patrones de anomalías climáticas se invierten, se dice que la PDO tiene un valor negativo (Mantua, 1999).

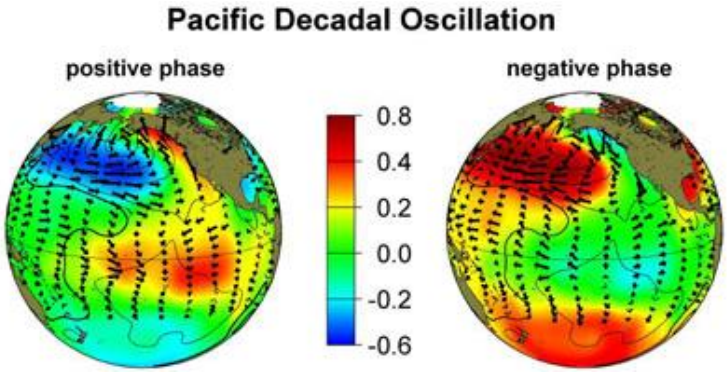


Figura 3.18. Variación en la temperatura durante el evento de PDO.

Fuente: (Obeysekera et al. 2011)

Su cálculo se basa en un análisis de componentes principales (ACP) con respecto a las anomalías mensuales de la TSM del Pacífico Norte. Para la separación de la variabilidad del índice del calentamiento global, se retira la media mensual global de las anomalías de TSM (Poveda et al., 2002). Se observa en la figura 3.19 que la fase cálida predominó desde 1925 a 1946 y desde 1980 hasta mediados de la década de 1990. Mientras que la fase fría de PDO prevaleció desde 1890 hasta 1924, nuevamente desde 1964 a 1974 y posteriormente en 1999 hasta la actualidad (Campozano et al., 2020). Los mecanismos que causan esta variabilidad de la PDO siguen sin estar claros (Yao et al., 2018).

Adicionalmente, estudios demuestran una relación entre PDO y ENOS (Figura 3.19) puesto que la fase cálida intensifica El Niño, mientras que la fase fría intensifica el patrón de La Niña, a pesar de que difieran en su escala de tiempo (Campozano et al., 2020). Para el ENOS se tiene una escala de persistencia entre 6 y 18 meses, mientras que para el PDO de 20 y 30 años (Yao et al., 2018). Además, resaltan posibles impactos de PDO en el Hemisferio Sur, con importantes anomalías climáticas en el Océano Pacífico Sur, Australia y en latitudes medias de América del Sur (Mantua y Hare, 2002).

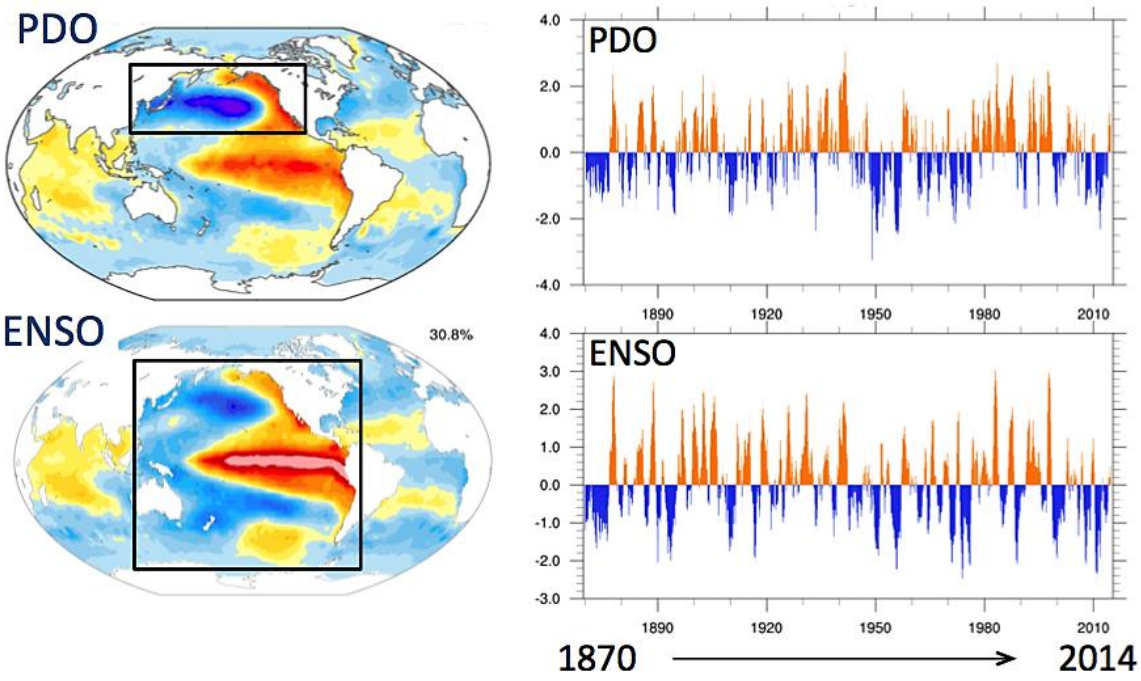


Figura 3.19. Relación entre el fenómeno ENOS y PDO.

Fuente: (Deser et al. 2016)

3.2.2.5 Oscilación Madden/Julian (MJO)

La Oscilacion Madden/Julian o Madden/Julian Oscillation (MJO) es una fluctuación intraestacional que se extiende hacia el este alrededor de los trópicos mundiales (40°E y 120°W) con un ciclo de 30 a 60 días (Figura 3.20, Gottschalck et al, 2005). El MJO es responsable de la mayor parte de la variabilidad climática en estas regiones y tiene un amplio impacto en parámetros atmosféricos y oceánicos como la velocidad y dirección del viento, nubosidad, precipitaciones, TSM y evaporación de la superficie oceánica (Zhang, 2005).

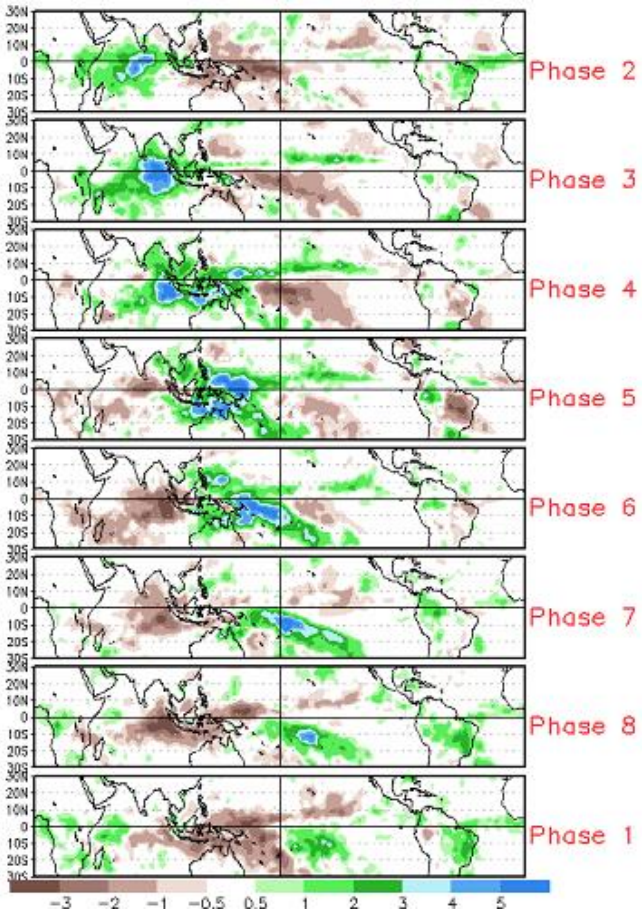


Figura 3.20. Patrones de lluvia generados por el MJO en los trópicos (30N-30S) de acuerdo con sus fases de influencia.
Fuente: Gottschalck et al, 2005.

Según Ventrice et al. (2013), la actividad convectiva del MJO se traslada de oeste a este a lo largo del ecuador, a una velocidad aproximada de 5 m/s, aunque su señal puede afectar los trópicos a nivel global debido a las conexiones con la

troposfera. El MJO puede llegar a ser bastante variable, con períodos de actividad moderada a fuerte seguidos de períodos de actividad escasa o nula (Gottschalck y Higgins, 2008). Generalmente, tiende a ser más activo durante los años neutrales del ENOS, y es ausente cuando los eventos de El Niño y La Niña son moderados o fuertes. Cabe recalcar que el MJO no causa El Niño o La Niña, pero puede contribuir a la velocidad de desarrollo e intensidad de los episodios del mismo (Gottschalck et al, 2005).

Debido a que los impactos de MJO son bien conocidos, especialmente en los trópicos globales, los períodos en los que el MJO está activo ofrecen oportunidades para mejorar la predicción y decisión climática (Gottschalck y Higgins, 2008). Diversos autores señalan al MJO como el responsable de las fluctuaciones entre estaciones de la precipitación y la temperatura (Paegle, et al., 2000; Lau & Waliser, 2012; Álvarez, et al., 2016). Para el caso de Sudamérica, Carvalho & Jones (2009) determinó que el MJO pronuncia la magnitud de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) con la presencia de precipitaciones abundantes de más de tres días.

3.2.3 CLIMA DEL ECUADOR

El Ecuador es un país ubicado al noroeste de Sudamérica, atravesado por la línea ecuatorial, de allí su nombre (Neill, 1999). Esta ubicación del Ecuador, genera poca estacionalidad a lo largo del año. Asimismo, la cordillera de los Andes, que divide al país en tres regiones principales (Costa, Sierra y Amazonía), genera una variación de las estaciones regionalmente, obteniendo así solo dos estaciones definidas: húmeda o invierno y seca o verano (Pourrut, 1983).

3.2.3.1 Región Costa

Dentro de la región costa se puede observar un clima tropical árido al sur, seco a húmedo hacia el centro-sur y muy húmedo al norte, debido a la presencia de la corriente fría de Humboldt. La estación húmeda en el litoral se caracteriza por sus altas temperaturas y abundantes lluvias, las cuales predominan entre los meses de diciembre y abril-mayo debido a la presencia de la corriente cálida de El Niño y la ZCIT (Neill, 1999). En contraste, la estación seca se encuentra representada por

sus bajas temperaturas y lluvias escasas, que se ven marcadas en los meses de junio a noviembre-diciembre, debido a la predominancia de la corriente de Humboldt y el desplazamiento del ZCIT hacia el norte (Neill, 1999).

La temperatura media de la región fluctúa entre los 24 y 25ºC, sin embargo, puede llegar a ser menor en zonas de cordillera. Mientras que sus niveles de precipitación anual varían con respecto a la zona de influencia de la corriente fría de Humboldt (Pourrut, 1983) y por un gradiente de lluvia de oeste a este, dónde la presencia de la cordillera hace que el aire húmedo que proviene del Pacífico, libere su humedad produciendo lluvias (Varela y Ron, 2018).

3.2.3.2 Región Sierra

En la región Sierra, las zonas de transición hacia el litoral y Amazonía, poseen un clima tropical muy húmedo, mientras que en la zona interandina predomina un clima templado y húmedo. Para los valles interandinos se observa un clima cálido y seco, en tanto que, en los páramos se tiene un clima frío de alta montaña (Neill, 1999). Esta región se ve influenciada alternadamente por masas de aires oceánicos y amazónicos y por la oscilación de la ZCIT, generándose dos estaciones lluviosas. La primera se observa entre los meses de marzo-abril y la segunda entre octubre-noviembre (Neill, 1999). Con respecto a las temperaturas se registran máximos entre diciembre y enero, con mínimos entre abril y junio (Pourrut, 1983).

3.2.3.3 Región Amazónica

La región amazónica se caracteriza por un clima tropical muy húmedo en toda la región durante todo el año, a causa de la retención de humedad por parte de los bosques amazónicos (Pourrut, 1983). Las precipitaciones en esta región son constantes, con máximos entre los meses de marzo y julio y mínimos en agosto y enero como resultado del movimiento de la ZCIT. Las tormentas son muy comunes en la región (>4500 mm) mientras que la temperatura promedio es de 24-25ºC, fluctuando muy poco (Pourrut, 1983).

3.3 LOS PARAMOS

Los páramos son ecosistemas ubicados en zonas intertropicales de alta montaña. En América del Sur, encontramos estos ecosistemas desde la Cordillera de Mérida en Venezuela hasta el norte de Perú, extendiéndose alrededor de países como Colombia, Venezuela, Ecuador y Perú (Mena & Hofstede, 2006). Debido a las características más bajas de los Andes en la zona sur del Ecuador, los páramos en esta zona se ubican a los 2800 msnm, mientras que en la zona norte y centro se encuentran sobre los 3300 msnm, adquiriendo una extensión de 13.000 km^2 aproximadamente, que corresponde al 5% del territorio Nacional. Esto lo cataloga como el país con mayor porcentaje de páramo en relación a su extensión total (Mena & Hofstede, 2006).

3.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los páramos generalmente, se desarrollan en temperaturas promedio de 7 °C, sin embargo, las temperaturas diarias suelen ser variables y de gran amplitud térmica, con cambios de hasta 20°C en el transcurso del día (Llambí et al., 2012). La precipitación anual se encuentra dentro de un rango de 700 mm en páramos secos y 3000 mm en páramos húmedos con algunos valores extremos en ciertas zonas. Globalmente se aduce que la estacionalidad de la lluvia es menor al norte y centro de los Andes, pues la humedad proviene tanto del Océano Pacífico como de la Amazonía (Beltrán et al., 2009) lo que genera una distribución espacial y temporal compleja de la lluvia en la cadena montañosa de los Andes (Beltrán et al., 2009; Llambí et al., 2012). Las masas húmedas pueden o no ingresar al valle interandino, dependiendo de la topografía de la zona, generando una variabilidad entre áreas áridas y lluviosas (Beltrán et al., 2009).

Los páramos ecuatorianos son caracterizados, generalmente, por una vegetación herbácea, careciente de árboles y dominada por pajonales, almohadillas y rosetas gigantes (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2013). Esta vegetación se encuentra acondicionada al tipo de suelo y a los estados extremos del clima que se presentan en estas altitudes, tales como temperaturas mínimas, vientos fuertes, humedad y nubosidad alta, insolación extrema y estacionalidad diaria. Estas condiciones generan procesos ecológicos (descomposición, ciclo de

nutrientes, productividad, etc.) graduales y la formación de una serie de adaptaciones en su fisiología y morfología (Carlquist, 1994), lo cual genera una gran gama de microclimas y formas de vida con un alto grado de endemismo (Luteyn, 1992), catalogándolo como una de las zonas con mayor biodiversidad a nivel regional y mundial (Camacho, 2013).

3.3.2 IMPORTANCIA

La importancia del páramo radica en su asombrosa capacidad de regular el agua superficial, aportando con suministros de agua estable para su aprovechamiento ya sea para uso doméstico, agrícola o producción de energía hidroeléctrica (Llambí et al., 2012). El páramo, además, encierra una gran biodiversidad, por lo que es fuente de una amplia variedad de recursos naturales. Asimismo, desempeña importantes funciones culturales, al existir una historia de relaciones entre la naturaleza y el hombre, siendo el hogar de muchas comunidades campesinas e indígenas que han pasado por una historia antigua de marginación y que han hecho del páramo, de manera deliberada o forzada, su fuente de sustento (Camacho, 2013).

Sin embargo, la sobreexplotación del suelo con malos o precarios métodos de agricultura, la expansión de la frontera agrícola y la ganadería intensiva, son algunos de los problemas que afronta este ecosistema, generando un deterioro de sus condiciones naturales (Camacho, 2013). Además, la variabilidad de la temperatura, generada por el cambio climático, reduce el volumen de agua a infiltrarse o escurrirse incrementando los volúmenes de evapotranspiración. Esto a su vez genera lluvias de mayor intensidad, que al existir poca cubierta vegetal, produce erosión y deterioro del suelo (Llambí et al., 2012). Esto, conjuntamente con lo anterior expuesto, incrementa su vulnerabilidad siendo trascendental su protección.

CAPITULO 4

4 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el procedimiento establecido para la recopilación de la base de datos necesaria para el estudio, el relleno de datos, el análisis espacio-temporal y la correlación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los Patrones Climáticos Globales (PCG).

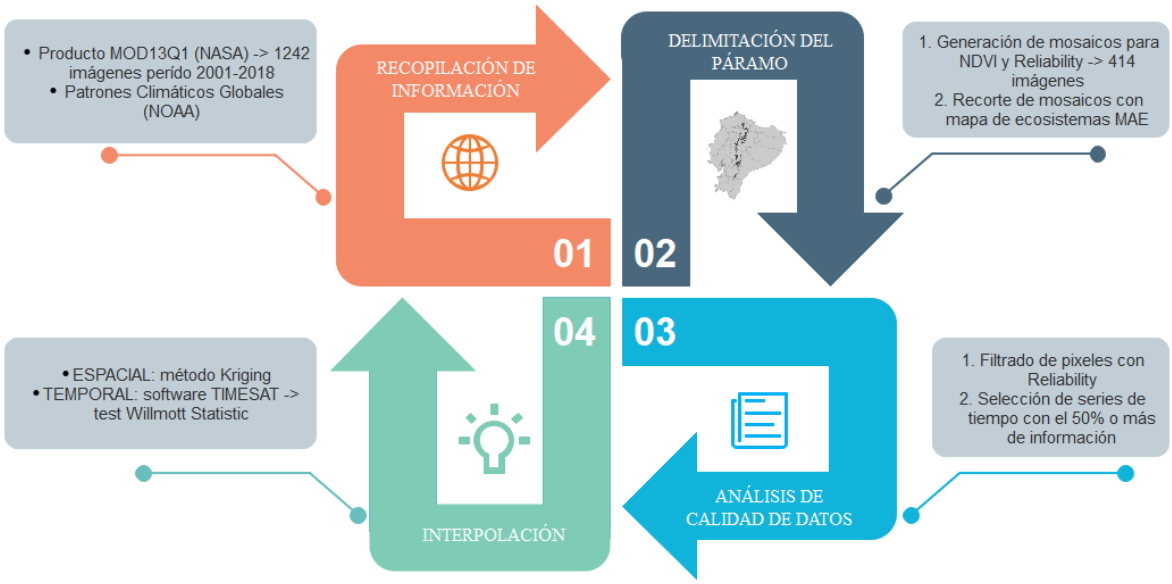


Figura 4.1. Metodología a seguir en el procesamiento de los datos.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.1 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Las imágenes recopiladas por el sensor MODIS están disponibles en la base de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio Estadounidense (National Aeronautics and Space Administration, NASA) y fueron descargadas de la página web https://earthexplorer.usgs.gov/. El producto satelital a utilizar es el MOD13Q1, el cual se encuentra dividido en “tiles” o “cuadrantes” de 1200km x1200 km aproximadamente, requiriendo para nuestra área de estudio el h9v9, h10v8 y h10v9 (Figura 4.2). Este producto posee 12 bandas espectrales, de las cuales la primera es la correspondiente al NDVI. Posee una resolución espacial de 250 m y una resolución temporal de 16 días, obteniendo así 23 ilustraciones por año y 1242 imágenes para el periodo de estudio de 2001 al 2018.

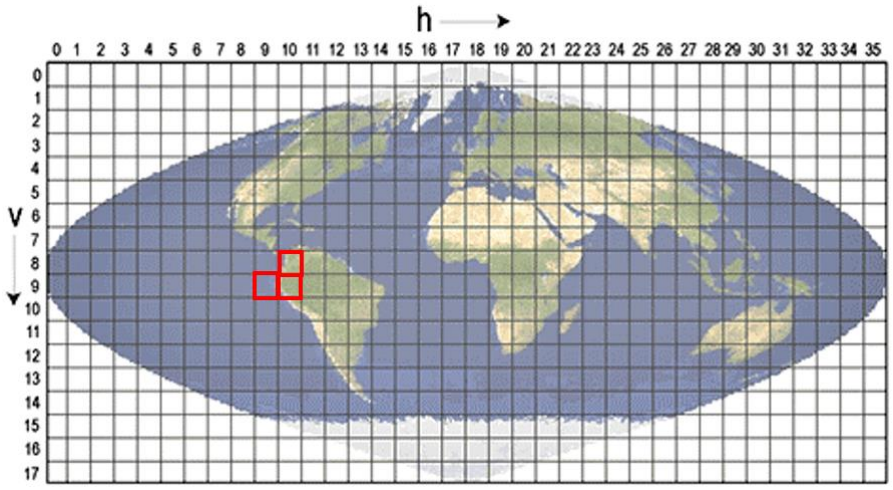


Figura 4.2. Cuadrantes del sensor MODIS utilizados.

El recuadro de color rojo corresponde a los cuadrantes usados en el estudio. Fuente: NASA

La recopilación de las series de tiempo de los patrones climáticos globales fue realizada a través de la base de datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica o National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Estos valores fueron agrupados en una tabla para cada índice en estudio (Anexo 1) la cual contiene los valores mensuales de los Patrones Climáticos Globales (PCG) para todo el periodo de estudio. Los enlaces de descarga correspondientes a cada índice se encuentran a continuación de cada tabla.

4.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

4.2.1 GENERACIÓN DE MOSAICOS

Se desarrolló un mosaico de las imágenes descargadas correspondiente a cada fecha (Muñoz et al., 2017), para lo cual se utilizó el software MODIS Reprojection Tool. Este permitió seleccionar la banda de NDVI y la banda de confiabilidad Pixel Reliability, además de efectuar un cambio de proyección Sinusoidal a proyección UTM zona 17S, con Datum WGS84. Como resultado se obtuvo un total de 414 mosaicos en formato GEOTIFF para NDVI y Pixel Reliability (Figura 4.3).

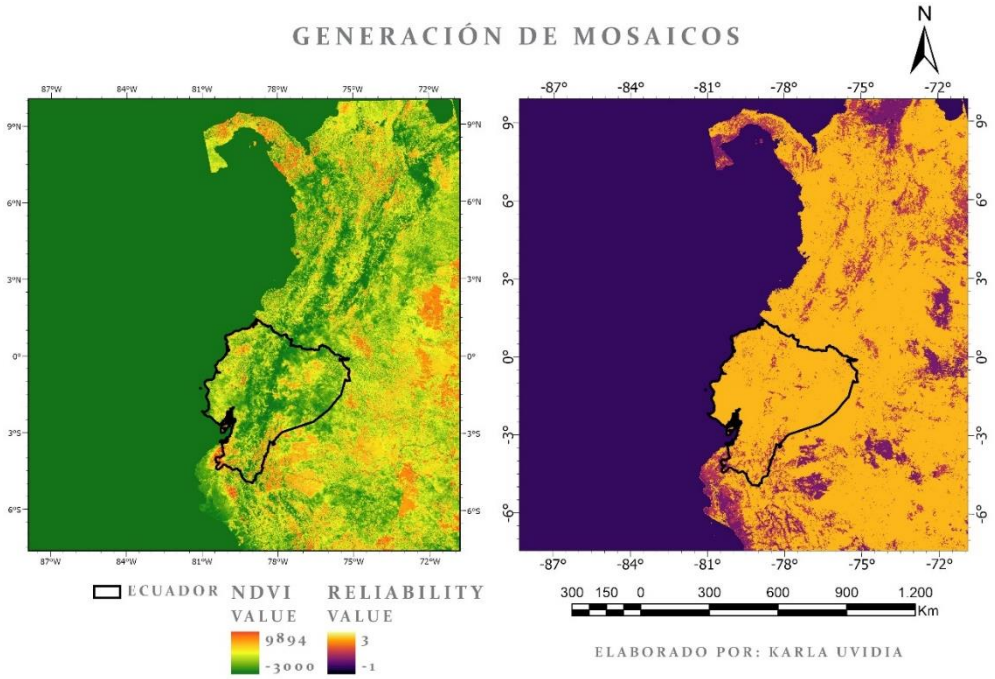


Figura 4.3. Generación de mosaicos para NDVI y Pixel Reliabilty, día 1 año 2001.
La figura de la derecha (izquierda) muestra los valores crudos de NDVI (valores de confiabilidad o Reliability). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.2.2 DELIMITACIÓN DEL PÁRAMO

Para la delimitación del páramo (Figura 4.4) se empleó el mapa de ecosistemas presentado en el año 2013 por el Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE) el cual posee una escala 1:100.000. A partir de este mapa, y mediante el software ArcGIS 10.5, se realizó el recorte de los mosaicos de NDVI y los mosaicos Pixel Reliability con el polígono correspondiente a la extensión territorial del páramo. Esta extensión del páramo, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente del Ecuador (2013), está comprendida por 36 clasificaciones de ecosistemas los cuales se muestran en el Anexo 2.

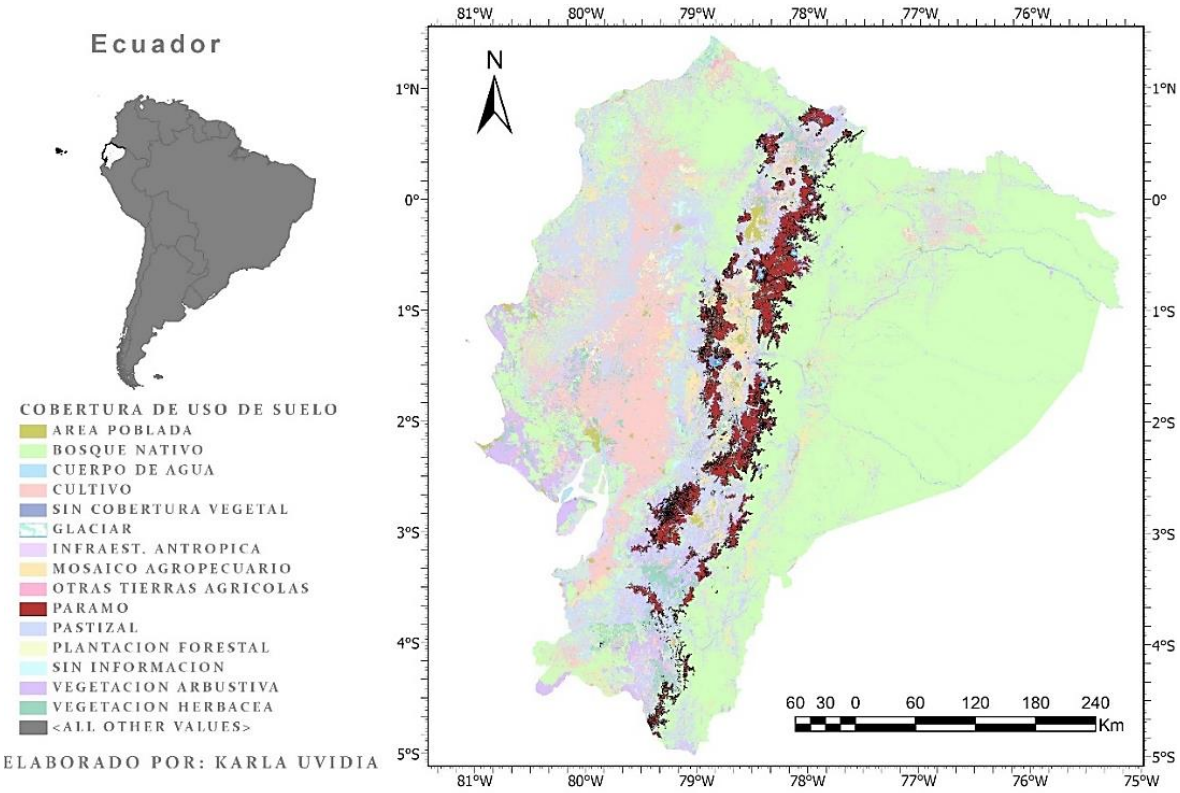


Figura 4.4. Delimitación del páramo.

Fuente: Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2013. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.2.3 ANÁLISIS DE CALIDAD DE NDVI

Posterior al recorte de las imágenes raster a la extensión del páramo, se procedió con el filtrado de los píxeles de baja confiabilidad, relacionando los datos de NDVI con los datos de Pixel Reliability. Este proceso fue ejecutado en el software MATLAB, el cual, permitió eliminar aquellos pixeles de NDVI cuyos valores de Pixel Reliability correspondan a -1, 2 y 3. A los valores 0 (buen dato) y 1 (datos marginales) se dio un peso de 1, mientras que a los valores -1 (no dato), 2 (nieve o hielo) y 3 (cobertura nubosa) un peso de 0.

4.2.4 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Una serie de tiempo corresponde a los datos que genera un píxel a lo largo de todo el periodo de estudio. El número total de series de tiempo que comprende la extensión del páramo es de 196,747, sin embargo, debido al filtrado de píxeles de baja calidad, se produjo una pérdida significativa de datos dentro de las series

de tiempo. Esto debido al requerimiento del software TIMESAT, el cual necesita de al menos el 50% de información útil para ejecutar el suavizado de la curva (Eklundh y Jönsson, 2017), por lo que la cantidad de series temporales, es decir de pixeles, se redujo a un total de 64903, que corresponden al 32,99% del total de pixeles (Tabla 4.1), y a una extensión alrededor de 4000 km2 que corresponde aproximadamente al 32% del área total del páramo ecuatoriano (Figura 4.4).

Tabla 4.1. Porcentaje de datos en cada serie de tiempo

PORCENTAJE DE DATOS EN LA BASE NDVI

Porcentaje de datos en cada serie de tiempo	Cantidad de series de tiempo	Porcentaje que representan las series en la base de datos	Extensión del terreno que representa [km^2]
90%	20	0.01%	1.25
85%	778	0.40%	48.63
80%	4088	2.08%	255.50
75%	10868	5.52%	679.25
70%	19143	9.73%	1,196.44
65%	27473	13.96%	1,717.06
60%	37977	19.30%	2,373.56
55%	50672	25.75%	3,167.00
50%	64903	32.99%	4,056.44
45%	80833	41.08%	5,052.06
40%	100056	50.86%	6,253.50
35%	118563	60.26%	7,410.19
30%	134915	68.57%	8,432.19
25%	150777	76.63%	9,423.56
20%	166114	84.43%	10,382.13
15%	179782	91.38%	11,236.38
10%	192087	97.63%	12,005.44

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

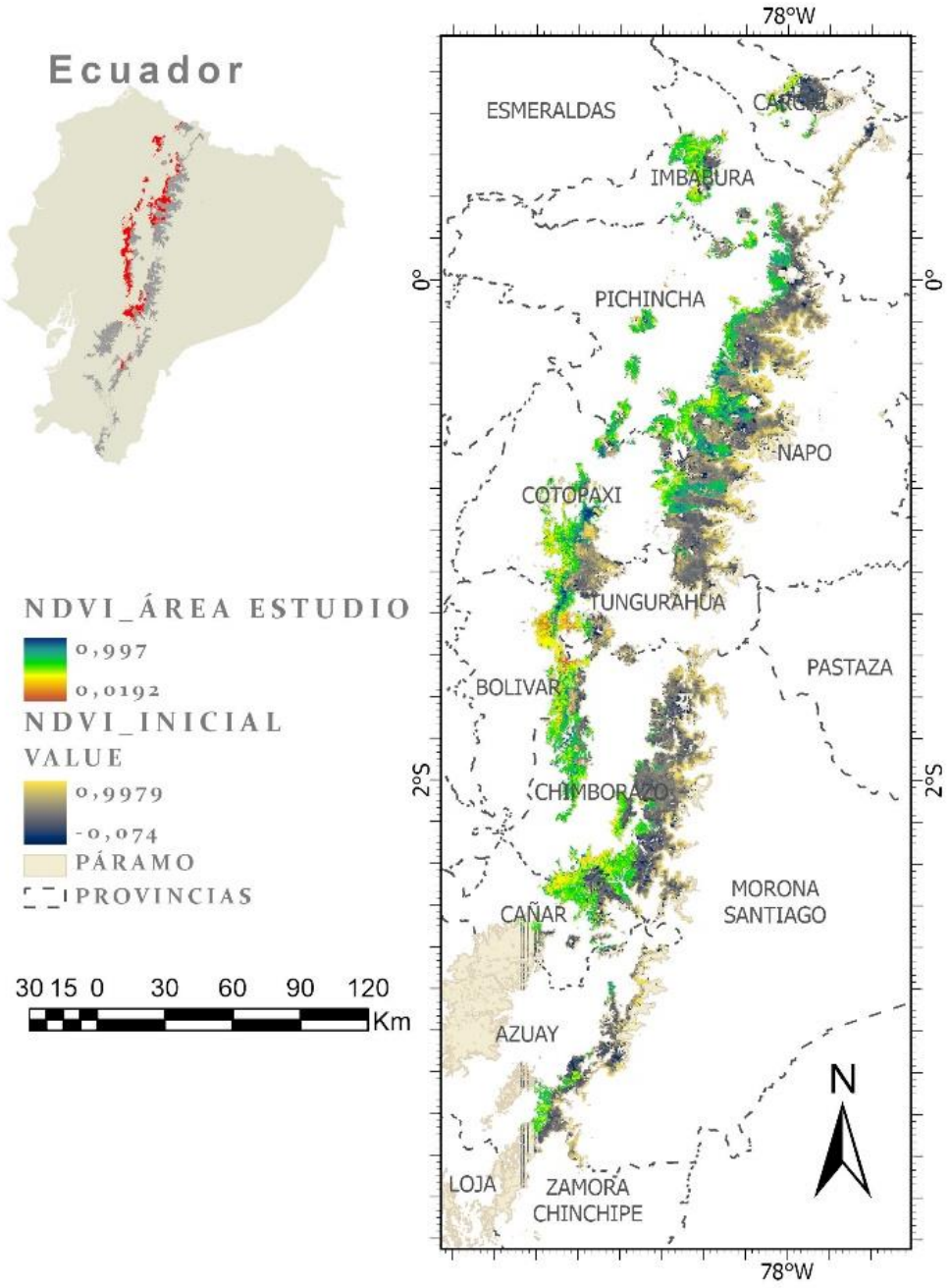


Figura 4.5. Área de estudio del páramo, día 1 año 2001.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.2.5 INTERPOLACIÓN DE DATOS DE SERIES DE TIEMPO

Este proceso se realizó en dos fases, la primera a través de una interpolación espacial y la segunda a través de una interpolación temporal.

4.2.5.1 Interpolación Espacial

La interpolación espacial fue desarrollada a través del método de interpolación Kriging. Este es un recurso geoestadístico que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados, proporcionando alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (GIS Geography, 2020b). Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación en la superficie, ajustando una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación (GIS Geography, 2020b). Para su aplicabilidad los datos deben tener una distribución normal y deben ser estacionarios, por lo que previamente se realizó un análisis exploratorio de las series de tiempo a través de histogramas y gráficos Q-Q normal con lo cual se observó el cumplimiento de estas condiciones.

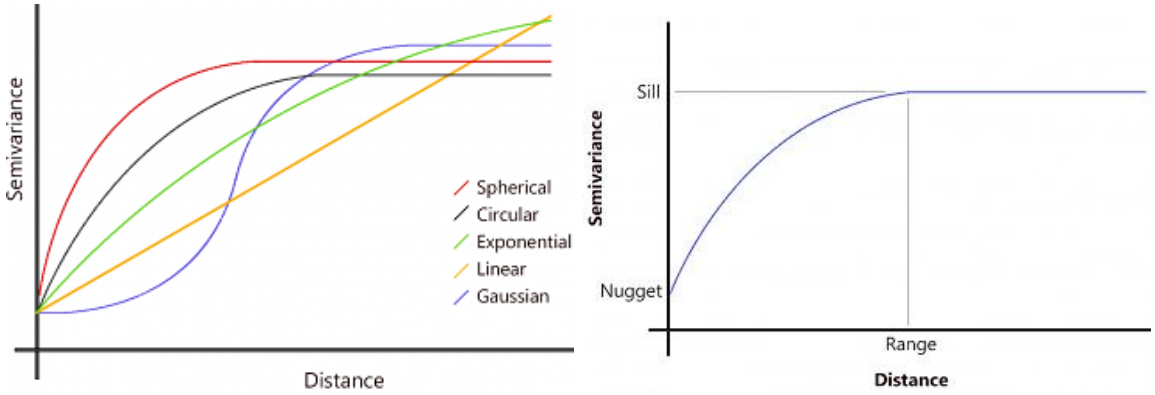


Figura 4.6. Tipos de semivariogramas y su estructura.
La figura de la izquierda (derecha) muestra los tipos de semivariogramas que se pueden usar (la estructura de un semivariograma). Fuente: (GIS Geography, 2020b)

Posteriormente, se procedió a realizar el cálculo de semivariogramas para cada fecha en estudio (414 fechas), por medio de la función *vgm* del software RStudio. Esta función, además, permitió elegir el semivariograma teórico que mejor se ajustaba a los datos. Para este análisis se usó principalmente modelos exponenciales, gaussianos y esféricos (Figura 4.6). A partir de la selección visual del mejor modelo, se creó un script para la obtención de los valores de la curva de ajuste (nugget, range y sill, Figura 4.6), los cuales fueron usados para el relleno de

los pixeles que carecían de datos (Adhikary et al., 2015). Una vez aplicada la interpolación se obtuvieron las imágenes rellenas espacialmente (Figura 4.8)

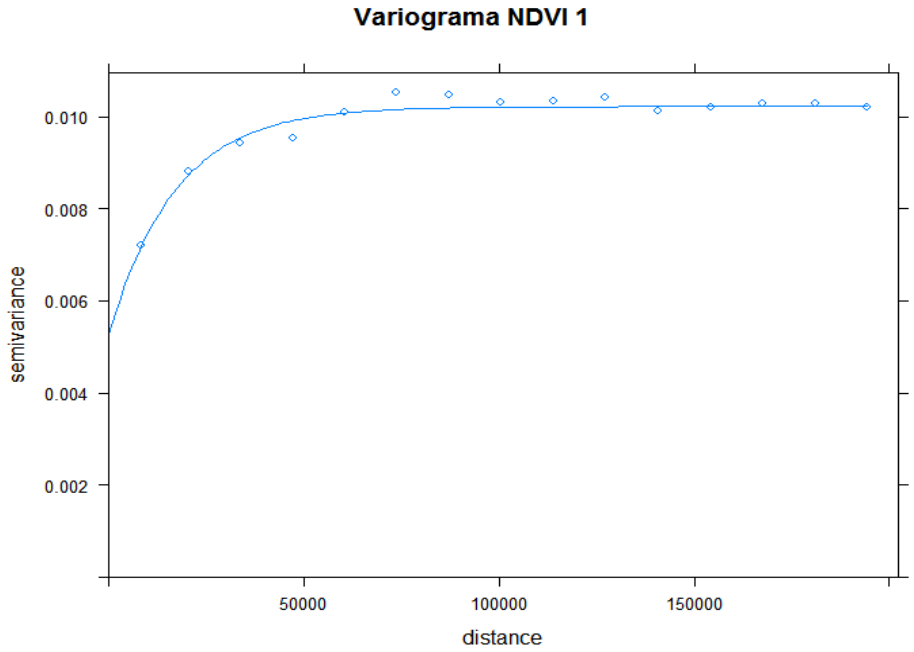


Figura 4.7. Modelo de variograma de tipo exponencial para el día 1.
Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

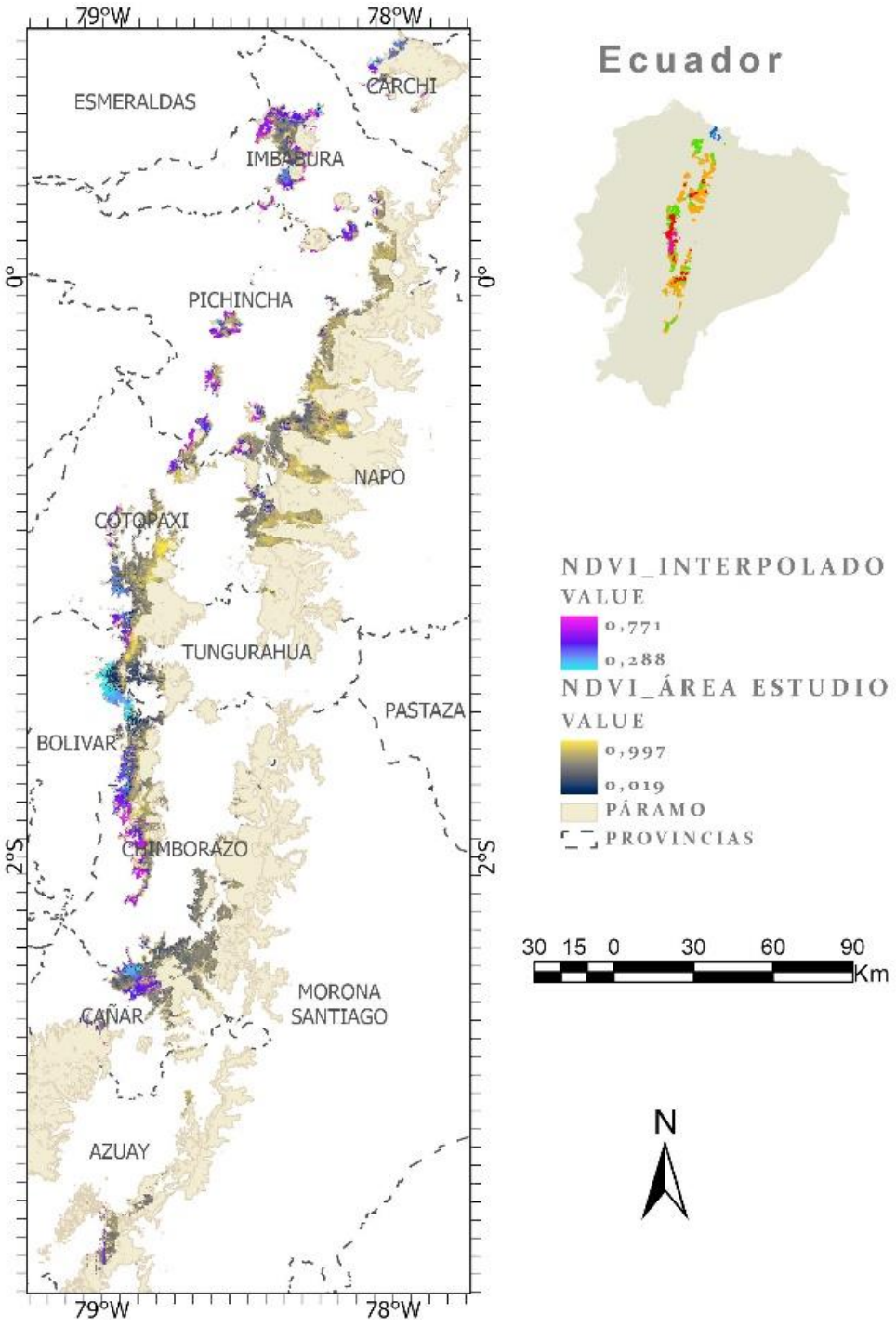


Figura 4.8. Interpolación espacial, día 1 año 2001.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.2.5.2 Interpolación Temporal

Se desarrolló la interpolación temporal con la ayuda del programa gratuito TIMESAT versión 3.3. TIMESAT es un software que permite analizar series temporales de datos de sensores satelitales, la estacionalidad que estos poseen,

así como su relación con las propiedades dinámicas de la vegetación, permitiendo conocer cambios en la vegetación a corto y largo plazo (Eklundh y Jönsson, 2017). El entorno de ejecución predeterminado para este programa es Matlab, sin embargo, existe una versión del software que incluye un entorno similar, con lo cual no es necesario tener una licencia de la interfaz (Eklundh y Jönsson, 2017).

TIMESAT procesa las series de tiempo en formato ASCII, para lo cual se transformó la información a este tipo de archivo por medio de códigos en el software RStudio, usando la información obtenida en la interpolación espacial ya que como menciona Gao et al., (2008), el software requiere de la existencia de al menos el 50% de información en una serie de tiempo para poder procesar los datos. En el archivo ASCII es necesario agregar, en la primera línea, la información sobre el número de años transcurridos por la serie temporal, (nyear = 18), la cantidad de datos por año (nptperyear = 23) y el número de series de tiempo (nts = 64903) para que los archivos puedan ser reconocidos por el programa (Eklundh y Jönsson, 2017).

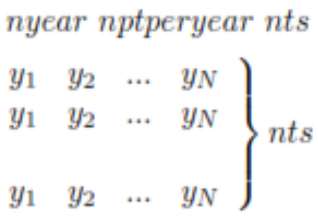


Figura 4.9. Estructura para el reconocimiento de un archivo ASCII.
Fuente: Eklundh y Jönsson, 2017

Una vez ingresados los archivos ASCII, se define el número de estaciones y su tiempo aproximado. Posteriormente, se filtra los datos o se ajusta los datos a través de métodos como el de Savitzky-Golay o métodos basados en ajustes ponderados para funciones de modelo logístico doble y gaussiano asimétrico (Eklundh y Jönsson, 2017). Para este estudio se escogió el filtro Savistky-Golay como método de suavizado al demostrar el mejor ajuste (visual) de acuerdo a la naturaleza de los datos. Al aplicar el método de suavizado, automáticamente la interfaz del software realiza el relleno de los espacios vacíos y elimina los datos

atípicos. Una vez logrado el ajuste, los parámetros de estacionalidad se calculan y se registran en los archivos de salida, así como las funciones ajustadas.

Finalmente, se comparó los resultados de TIMESAT con pixeles del 50 % al 90% de información de la base original, con el fin de observar el acoplamiento del relleno de los datos, consiguiendo buenos resultados. Finalmente, se usó el test estadístico Willmott Statistic, que permitió evaluar el método de Savitzky Golley, obteniendo valores mayores a 0.5, lo cual nos indica que sus valores son aceptables. Una vez concluida la interpolación, se obtuvo como resultado 64903 series de tiempo, correspondientes al área de estudio, rellenadas y suavizadas en su totalidad para su posterior análisis.

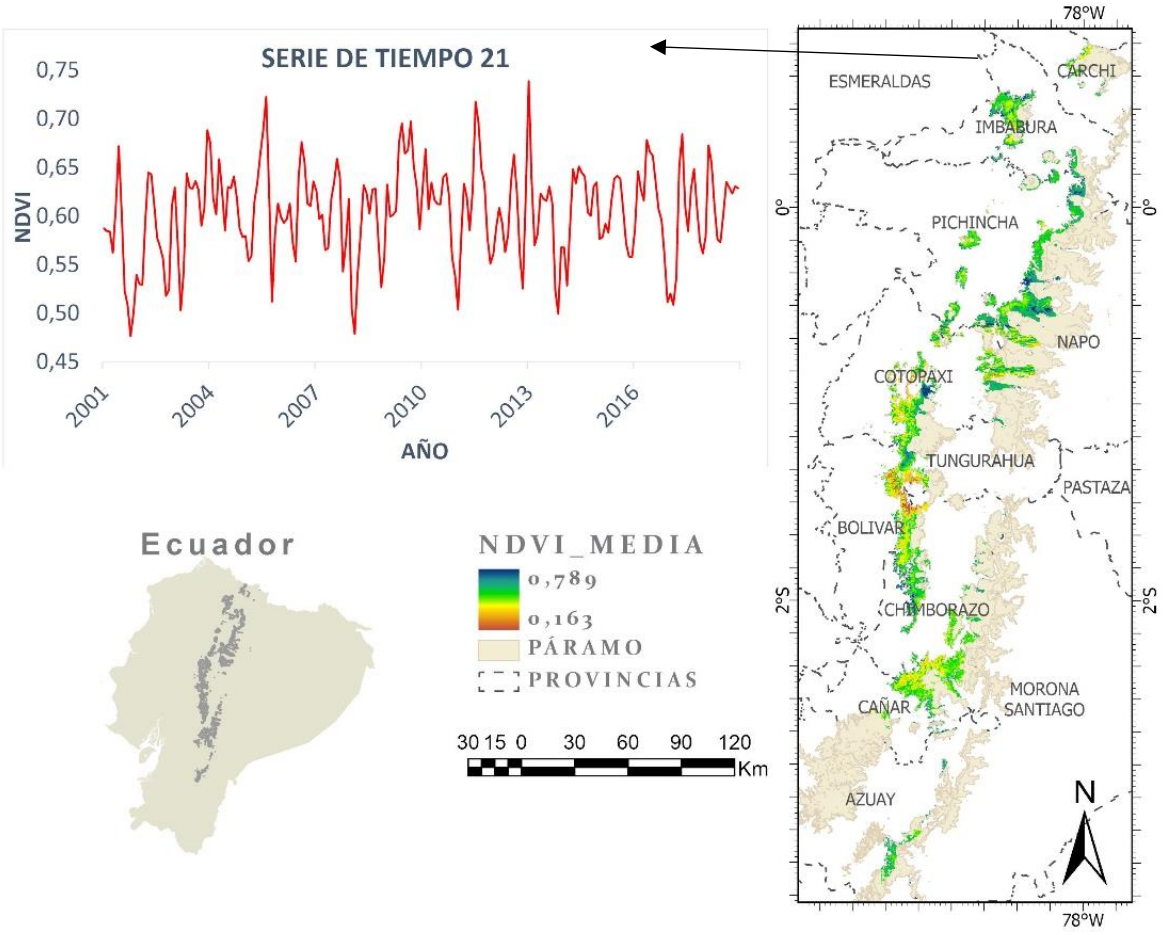


Figura 4.10. Serie de tiempo 21 interpolada temporalmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenido el relleno espacial y temporal de los datos, se llevó adelante el análisis de la variabilidad temporal, espacial y espacio-temporal de NDVI, así como la correlación entre los Patrones Climáticos Globales (PCG) y el NDVI. Para ello, se priorizó la obtención del promedio mensual de los valores de NDVI, ya que la base de datos se encuentra con una resolución temporal quincenal.

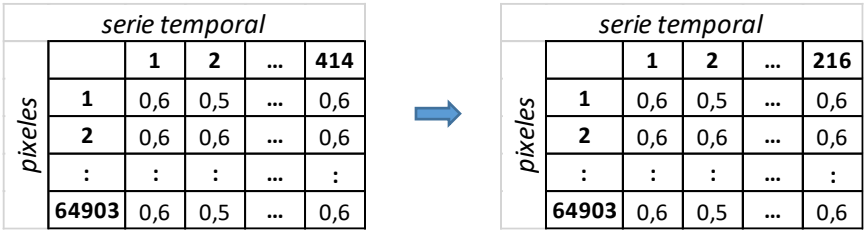


Figura 4.11. Reducción de la matriz de NDVI a valores mensuales.
Esta será la matriz base para los análisis posteriores. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Posteriormente, se dividió por ecosistema a la base de datos para observar el comportamiento de la vegetación. El área de estudio comprende mayormente a cinco ecosistemas importantes del páramo. En la tabla 4.2 se observa el porcentaje que representa cada uno de ellos dentro del área de estudio, así como la cantidad de pixeles que poseen. Los códigos expuestos son códigos únicos elaborados por el Sistema de Clasificación de Ecosistemas realizado por el Ministerio de Ambiente del Ecuador (2013) que permiten identificar a cada uno de los ecosistemas, cumpliendo con requerimientos con respecto a su región, piso climático, fisonomía y fenología. Estos códigos fueron utilizados en el proceso de análisis para la simplificación del nombre del ecosistema.

Tabla 4.2. Ecosistemas dentro del área de estudio

CODIGO	ECOSISTEMAS	PIXELES	%
AsSn01	Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	5867	9%
HsSn02	Herbazal del Páramo	41841	64%
HsSn03	Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	3788	6%
HsNn03	Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	2943	5%
RsSn01	Frailejones	731	1%
	TOTAL	55170	85%

Fuente: Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2013. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.3.1 ANÁLISIS TEMPORAL

Para el procesamiento y análisis temporal de los valores de NDVI, se llevó a cabo el siguiente proceso metodológico detallado en la figura 4.12 y que se describirá con detalle en el siguiente apartado.

Se realizó un promedio espacial, es decir, se obtuvo un promedio de todos los pixeles de ese ecosistema para cada fecha en estudio. Esta media fue llevada a una nueva matriz en la que se ubicó los valores de enero a diciembre de cada año en las fila (figura 4.12). A partir de esta se desarrolló un promedio para ese mes durante todos los años (promedio intra-anual) y un promedio anual para los 18 años de estudio (promedio interanual). A partir de esta información se utilizaron técnicas de estadística descriptiva, calculando parámetros como la media, máximos, mínimos y desviación estándar intra-anual e interanual para identificar y caracterizar el comportamiento de la vegetación y se comparó con valores de precipitación y temperatura obtenidos a partir de imágenes satelitales. Mientras que para observar la variabilidad interanual y mensual del NDVI, se determinó el Coeficiente de Variación (CV), siendo:

$$CV = \frac{Desviación\ Estándar\ (S)}{Media\ (X)} * 100$$

Posteriormente, se estandarizó los valores de NDVI (valores Z o anomalías estandarizadas) con el objeto de eliminar la señal estacional, y para determinar la desviación de NDVI en relación con los valores medios mensuales (van Leeuwenet al., 2013; Huber y Fensholt 2011). Cuando los valores son negativos (positivos), se presume que las condiciones de vegetación se encuentran por debajo (encima) de las normales generando una menor (mayor) vigorosidad de la vegetación, mientras que los valores tendientes a cero reflejan valores neutros o sin variaciones relevantes. Estas anomalías o valores de *z* se calcularon como:

$$Z = \frac{X_i - X}{S}$$

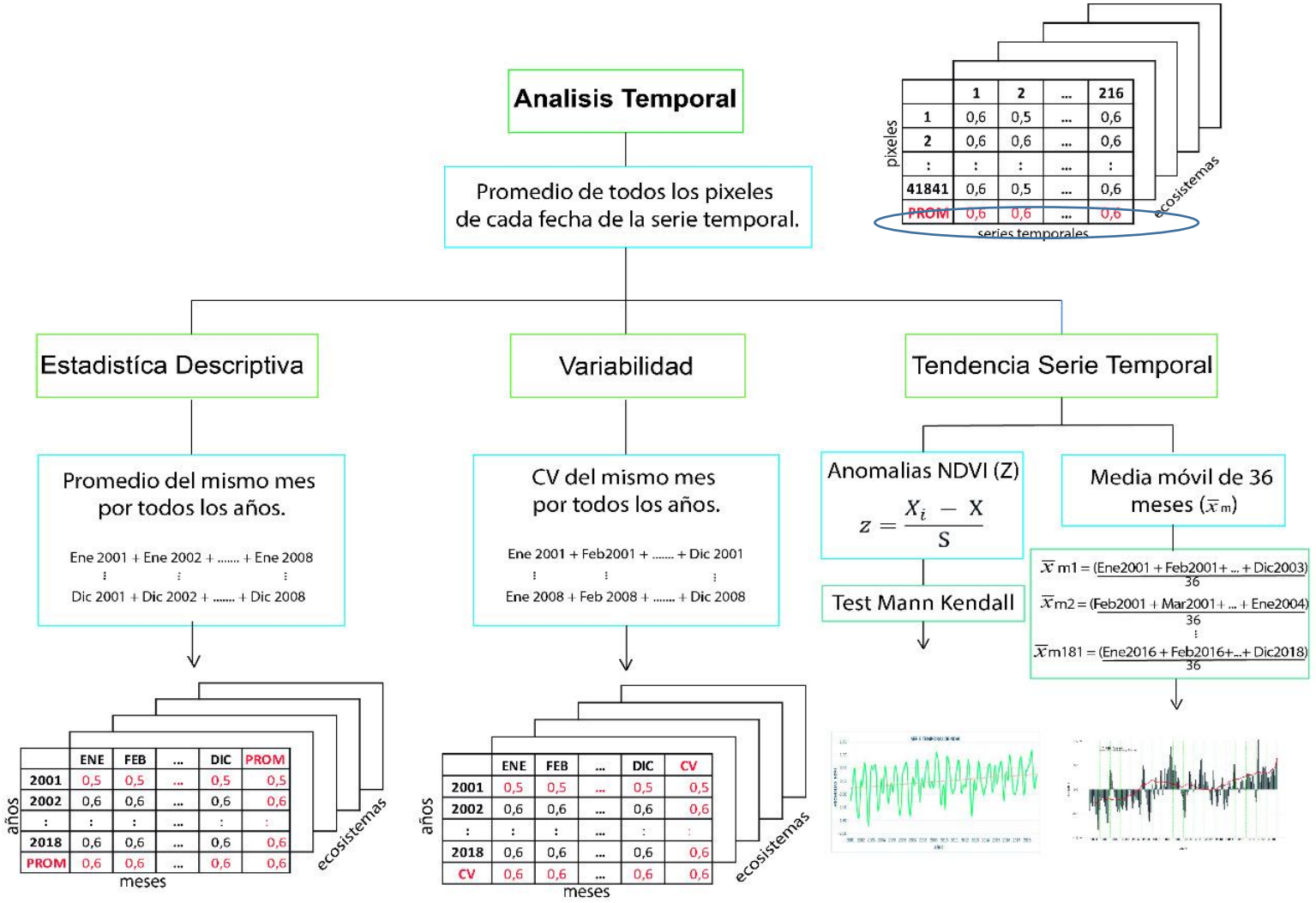


Figura 4.12. Esquema de procedimiento realizado en el análisis temporal del NDVI.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020.

Donde X_i representa el dato a estandarizar, *X* es la media de la muestra y *S* es la desviación estándar. Además, se calculó el test de Mann Kendall, mediante el software RStudio, para comprobar las tendencias de las curvas obtenidas.

Finalmente, se suavizó las series temporales mediante un promedio de ejecución de 36 meses para aislar parcialmente la variabilidad interanual. Las medias móviles se calcularon promediando los 36 meses desde enero de 2001 hasta diciembre de 2003 que se trazaron como el promedio del mes 1, desde febrero de 2001 hasta enero de 2004 se estableció como el promedio del mes 2, y así sucesivamente (Barbosa et al., 2006).

4.3.2 ANÁLISIS ESPACIAL

Para el procesamiento y análisis espacial de los valores de NDVI, se siguió el siguiente proceso metodológico detallado en la figura 4.13 y que se describirá con detalle a continuación.

Para el análisis espacial se calculó el promedio de la serie temporal, es decir, un promedio de todas las fechas (216 fechas) del periodo de estudio para cada uno de los pixeles que conforman el páramo (figura 4.13). Además se desarrolló un promedio para ese mes de todos los años, es decir, se promedió todos los valores de enero de los 18 años, todos los valores de febrero de los 18 años, así sucesivamente (figura 4.13).

De esta información se utilizaron las mismas técnicas de estadística descriptiva usadas en el análisis temporal, así como el CV, para identificar y caracterizar el comportamiento de la vegetación. Además, se escogió dos meses en los que se registre los valores más altos y más bajos de NDVI (mayo y septiembre respectivamente), y se analizó las zonas en las que ocurre la menor y mayor variabilidad. Estos datos fueron espacializados y divididos en tres secciones: la sección A que corresponde a la zona norte, la sección B que muestra la zona centro occidental y la sección C que indica la zona sur del páramo. Esto con el fin de tener una mejor visualización del área de estudio.

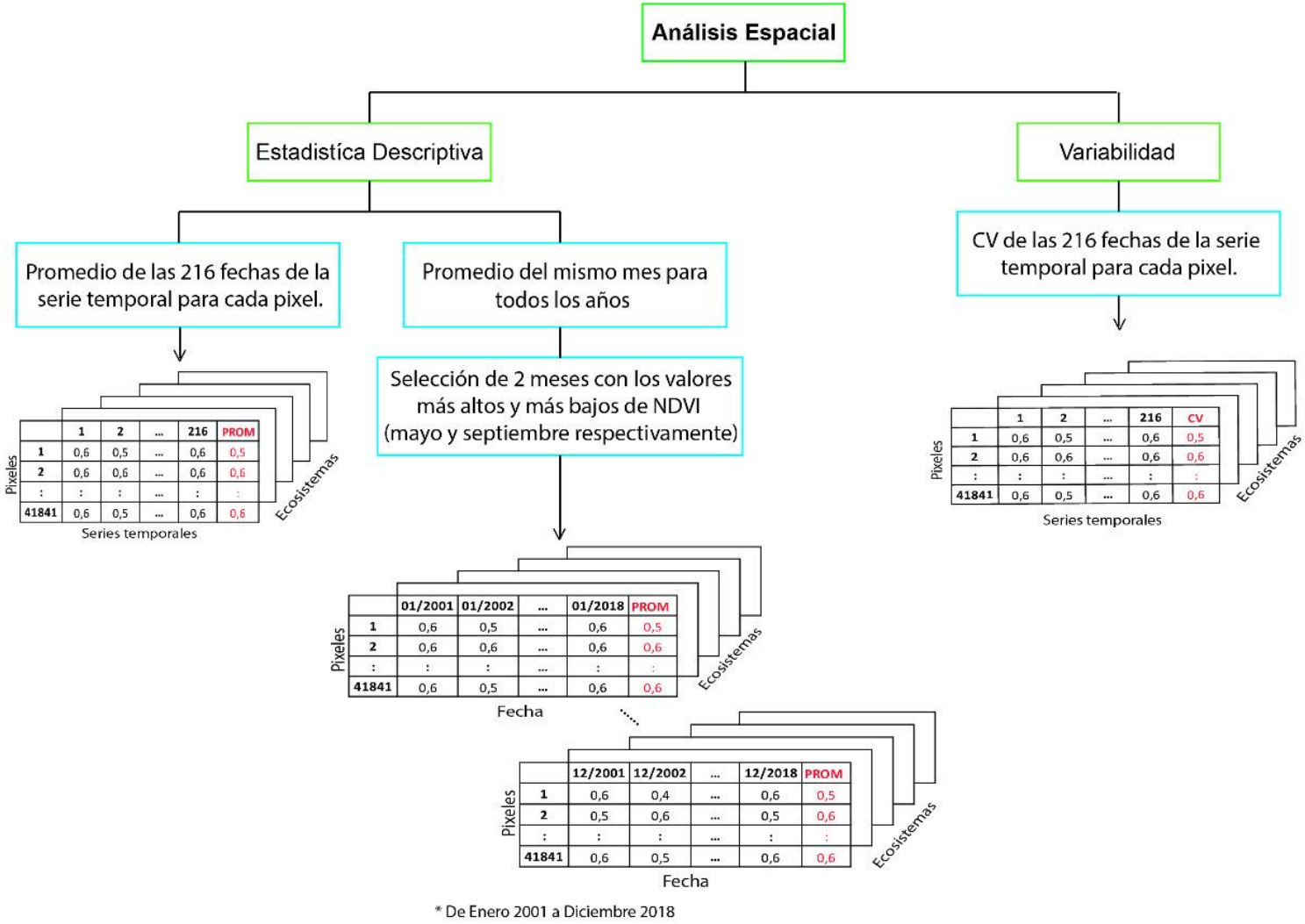


Figura 4.13. Esquema de procedimiento realizado en el análisis espacial del NDVI.

Elaborado por: Uvidia Karla, 202

4.3.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL

El análisis espacio-temporal del páramo permitirá la observación a profundidad del comportamiento de la serie temporal del NDVI en secciones en las cuales a lo largo del análisis se ha observado una particularidad, además de un nivel latitudinal y longitudinal, con el fin de proporcionar información adicional acerca de la variabilidad de la vegetación, cumpliendo con los objetivos del estudio.

Para ello, se tiene cuatro puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad dentro del análisis anteriormente desarrollado, espacial y temporal (Frailejones, Antisana, Chimborazo y Pallatanga) y cuatro puntos de acuerdo a su ubicación geográfica (Cotacachi al norte, Sangay al sur, Cotopaxi al este y Quilotoa al oeste), para evaluar el comportamiento de la serie temporal y el promedio intra-anual e interanual de NDVI. Estos datos son contrastados con los datos de NDVI del ecosistema en el que el punto recae para observar la variación del índice dentro de cada ecosistema, encontrándolos de esta manera:

Tabla 4.3. Asignación de puntos al ecosistema correspondiente.

PUNTO	ECOSISTEMA
Cotacachi	HsSn02
Sangay	HsSn02
Quilotoa	HsSn02
Cotopaxi	HsSn02
Frailejones	RsSn01
Chimborazo	HsSn03
Pallatanga	HsSn02
Antisana	HsSn02

Herbazal del Páramo (HsSn02), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03) y Frailejones (RsSn01). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

4.3.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI Y PATRONES CLIMÁTICOS GLOBALES

Primeramente, es necesario mencionar la particularidad de los valores del índice MJO en comparación con los otros. Este índice posee registros para las diferentes longitudes por las cuales atraviesa (20E, 70E, 80E, 100E, 120E, 140E, 160E, 120W, 40W y10W) por lo cual fue necesario ejecutar una interpolación entre los 40W y 120W para obtener valores cercanos a nuestra longitud (80W), calculando de la siguiente manera:

$$MJO_{80w} = \left(\frac{MJO_{120w} - MJO_{40w}}{120 - 40} * 40\right) + MJO_{40w}$$

Además, para el análisis de las correlaciones, es indispensable que todos los valores tanto del NDVI como del PCG sean mensuales, por lo cual, además, fue necesario promediar los valores de MJO para tener uno por mes, ya que poseen una temporalidad de cada 5 días. Para el procesamiento y análisis de las correlaciones entre los valores de NDVI y los PCG, se siguió el siguiente proceso metodológico detallado en la figura 4.14 y que se describirá con detalle en los siguientes párrafos.

Para el análisis de la variación de la cobertura vegetal del páramo ante los patrones climáticos globales, es necesario determinar la correlación existente entre el NDVI y los PCG. De acuerdo con (van Leeuwenet al., 2013; Huber y Fensholt 2011) para obtener una mejor correlación es recomendable que cada serie temporal de PCG se encuentre suavizada. Para ello fue necesario calcular una media móvil de 3 meses mediante un código en el software RStudio. Mientras que para la serie temporal de NDVI esto no es necesario ya que fue suavizada en la interpolación temporal ejecutada en TIMESAT.

Teniendo estas dos bases de datos listas se procedió al cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (*r*), con su respectiva significancia. Para ello, se hizo uso de la función *cor* de RStudio la cual calcula tanto el coeficiente (*r*) como la significancia (*p-valor*). Las correlaciones que se desarrollaron para cada pixel fueron: una correlación global que incluye todos los valores temporales mensuales (216 datos tanto para el PCG como para el NDVI); y una correlación por año que abarca los valores de los 12 meses de cada año. Los valores resultantes de la correlación están comprendidos entre 1 y -1 donde valores positivos (negativos) indican una correlación directamente proporcional (inversamente proporcional), mientras que valores cercanos a cero denotan ausencia de correlación (Morales, 2011). Con respecto a la significancia, se clasificó a los valores en “significativos” o “no significativos”. Siendo aquellos con un *p-valor* inferior a 0,05 significativos y las que lo superan o igualan no significativas, las cuales fueron eliminadas para el análisis espacial.

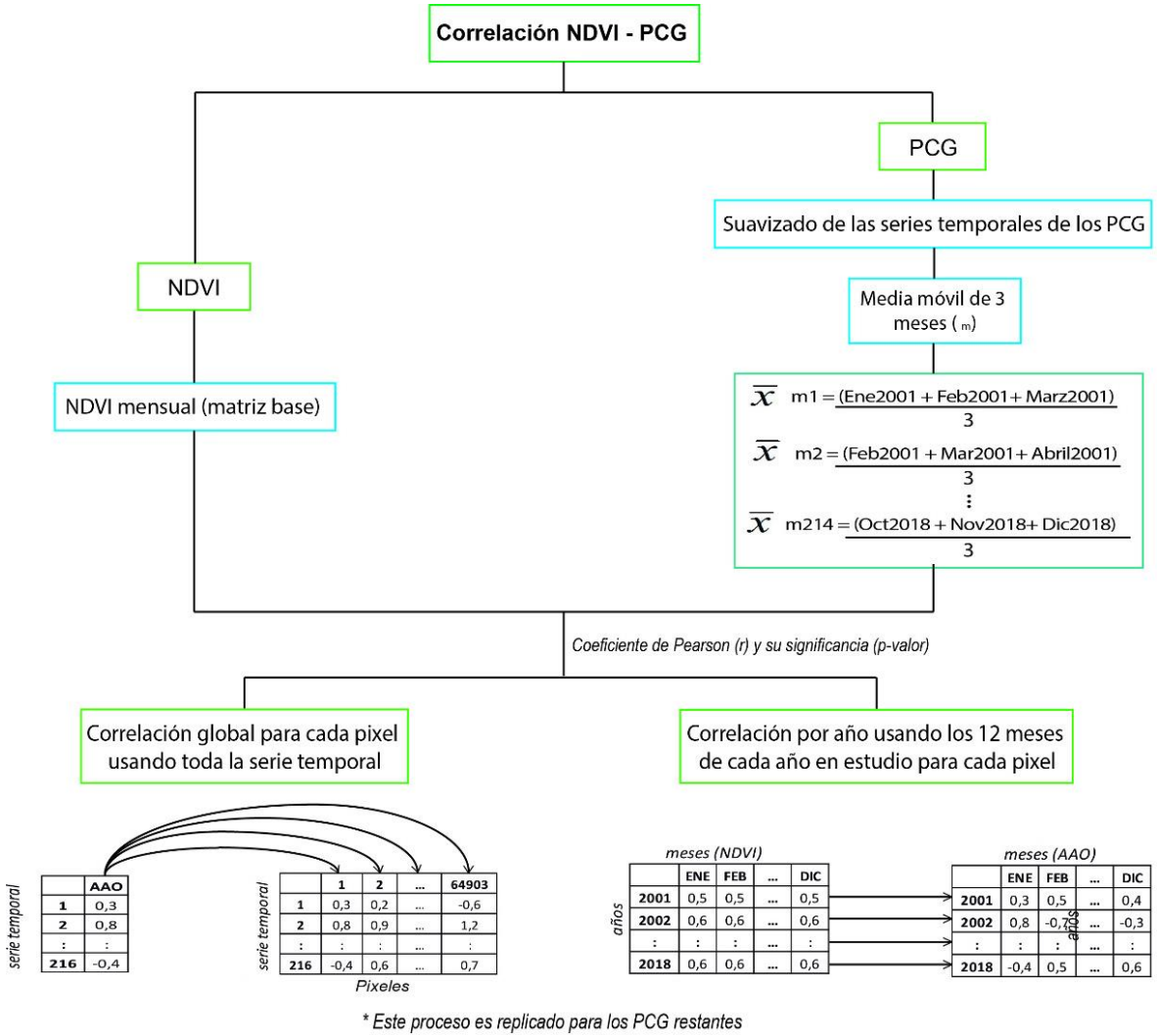


Figura 4.14. Esquema de procedimiento realizado en el análisis de correlación entre NDVI y PCG.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Una vez obtenidos los valores estadísticamente significativos de la correlación general, se los rasterizó y se analizó espacialmente. Por el contrario, para la correlación de cada año del periodo de estudio, se graficaron boxplots o diagramas de caja para apreciar su distribución y variabilidad con el pasar de los años (Vallejo y Ramírez, 2018).

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el estudio de la dinámica espacio-temporal del páramo a través del NDVI, se reflejó la variación de los mismos tanto entre estaciones como en el transcurso de los años, así como geográficamente. Estas variaciones se deben tanto a variables climáticas como a influencia de patrones climáticos globales y a la topografía del lugar, tipo de suelo o vegetación, como se observa a continuación.

5.1 ANÁLISIS TEMPORAL DE NDVI

La Figura 5.1 representa los promedios espaciales de cada ecosistema para todos los valores de enero de los 18 años, de febrero y así sucesivamente. El ciclo comienza con un incremento del valor de NDVI a partir del mes de enero hasta alcanzar su pico más alto en mayo (AsSn01, 0.610; HsSn02, 0.611; HsSn03, 0.546; HsNn03, 0.599), observándose este patrón en todos los ecosistemas con excepción de los Frailejones (RsSn01) en el que su pico más alto se encuentra en el mes de junio con un valor de 0.584.

Posteriormente, se observa un decrecimiento del NDVI hasta alcanzar el valle más acentuado de la curva en septiembre para 4 de los ecosistemas (AsSn01, 0.522; HsSn03, 0.445; HsNn03, 0.529; HsSn02, 0.541), mientras que para los Frailejones (RsSn01) su valle más acentuado se encuentra en octubre con un valor de 0.530. A partir de estos meses sus valores se elevan hasta diciembre en donde el ciclo se repite.

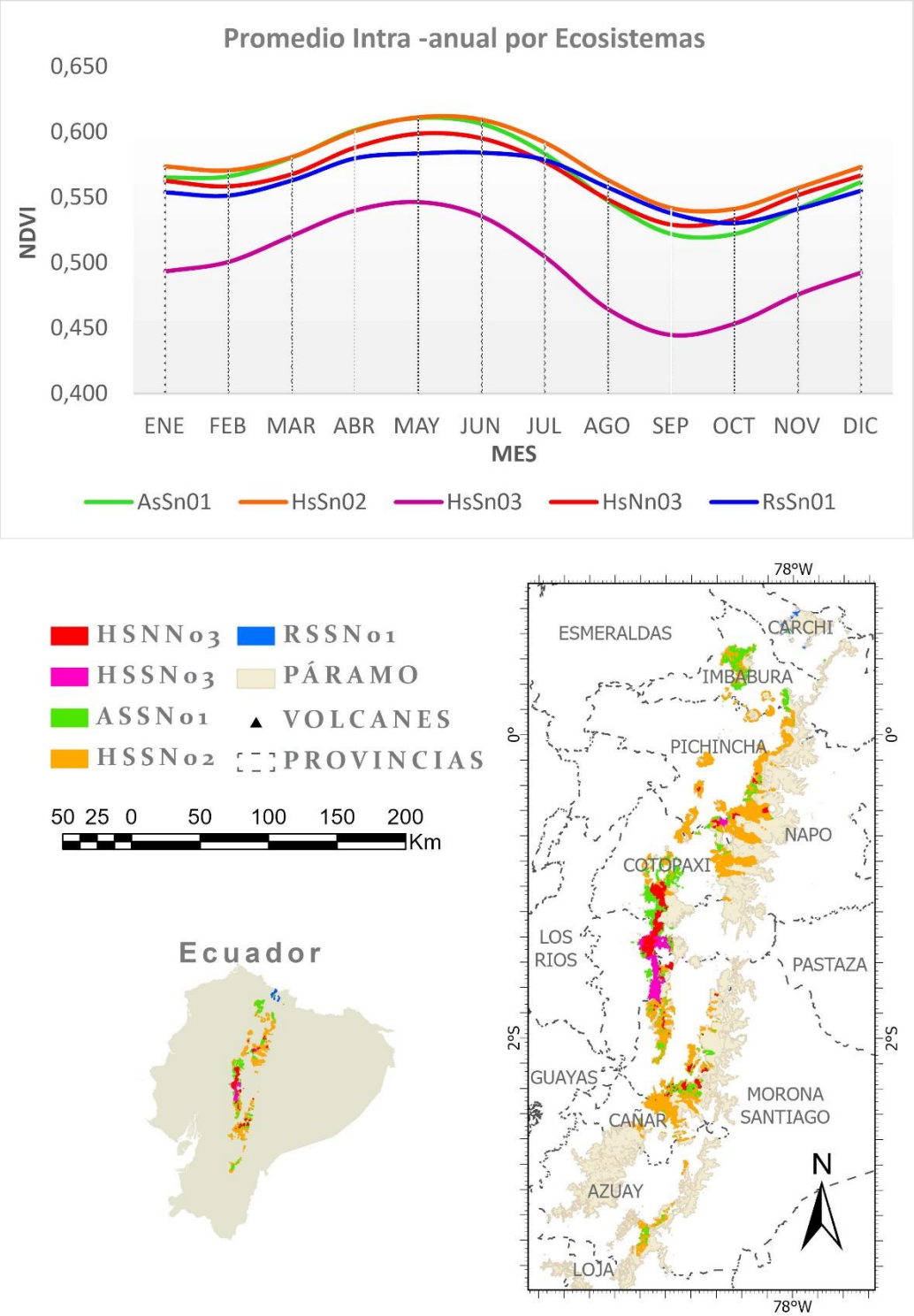


Figura 5.1. Promedio espacial Intra-anual del NDVI por Ecosistemas.
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), Herbazal del Páramo (HsSn02), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y Frailejones (RsSn01). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

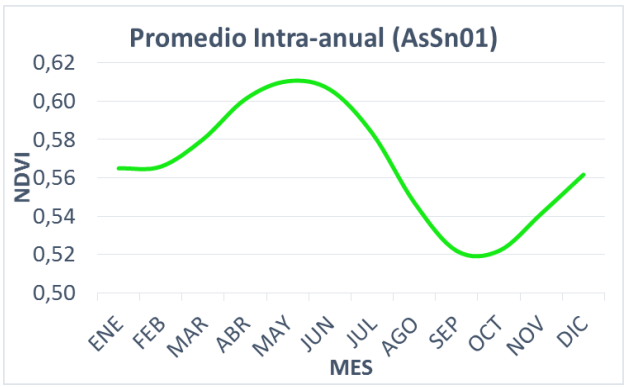
La figura 5.2 muestra el promedio entre temporadas del NDVI junto con la precipitación para cada ecosistema. Se observa un comportamiento bimodal tanto de la precipitación como de la vegetación. El Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), Herbazal del Páramo (HsSn02) y Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03) muestran el pico y valle más acentuado de precipitación en abril y agosto respectivamente, mientras que para el NDVI estos recaen en mayo y septiembre, reflejándose los efectos de las lluvias en la vegetación un mes después de las mismas. Además, el HsSn03 presenta valores más bajos de NDVI durante todos los meses (entre 0.44 y 0.55), en comparación con los otros ecosistemas (entre 0.53 y 0.60). Esto se debe a que este ecosistema, ubicado dentro de la Reserva de Producción Faunística del Chimborazo, se caracteriza por un clima seco, lo cual se puede observar en el gráfico de la precipitación al tener pocos meses (febrero-abril) de lluvias altas y una disminución elevada de las mismas en los meses posteriores. Además, las especies de plantas que se encuentran allí son poco resistentes o resilientes a las condiciones climáticas extremas que se dan en esta zona (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013), lo cual genera que este sea un ecosistema frágil ante el cambio climático.

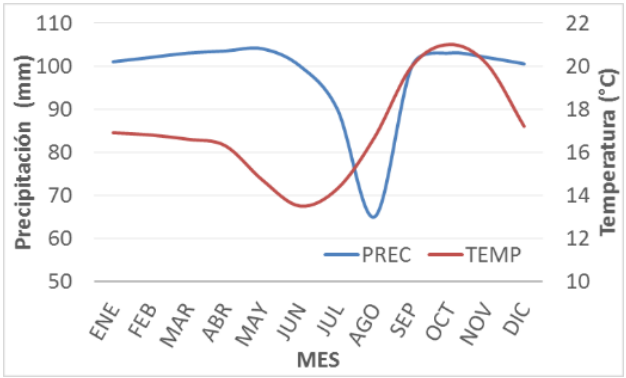
En la figura 5.2 se observa, además, que el pico máximo de la precipitación en el Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) recae en marzo, mientras que el de NDVI se registra en mayo, lo cual reflejaría la buena capacidad de retención de agua que posee su suelo, a pesar de sus precipitaciones bajas, y la buena resiliencia de la vegetación, ya que los valores de NDVI se mantienen en promedio con los otros ecosistemas. Esta baja precipitación puede deberse a la altitud a la que se encuentra (4100-4500 msnm), mucho más alta que los ecosistemas restantes, ya que la humedad puede quedarse en los ecosistemas de menor altitud. Algo similar ocurre con el RsSn01 en el que se registra una disminución abrupta de la precipitación entre mayo y junio, sin embargo, los valores de NDVI no se ven muy afectados.

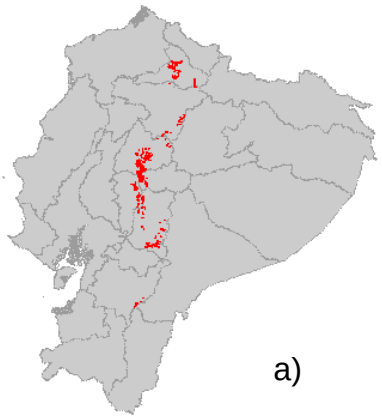
Con respecto a la temperatura, se observan pequeñas variaciones entre estaciones. Además, de acuerdo con Llambí et al. (2012) las temperaturas en el páramo a lo largo del día son variables y de gran amplitud térmica. De acuerdo a Buytaert et al., (2006), por debajo de los 4000 m de altura, no son frecuentes las

heladas y si estas llegan a darse, se encuentran restringidas a unas pocas horas antes del amanecer, mientras que a mayores alturas, la frecuencia de heladas es mayor, pero la acumulación también es baja, por el aumento de la temperatura a lo largo del día, por lo cual no influiría en la temporalidad de NDVI en gran medida.

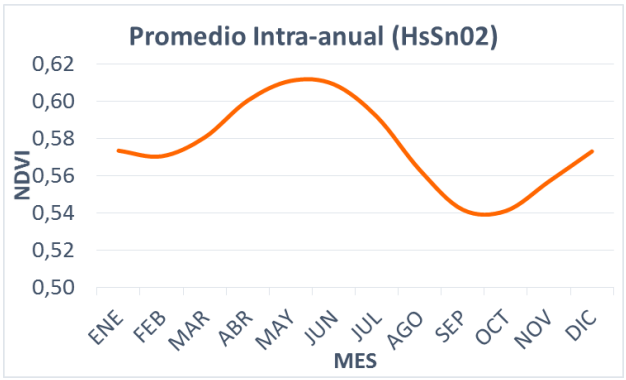
Este comportamiento de la vegetación responde evidentemente a la estacionalidad de la región, en donde el mayor decrecimiento de NDVI se genera en la temporada seca (junio a septiembre) y un incremento de NDVI en la temporada lluviosa (octubre a mayo). Esto nos indica que los períodos estacionales de la precipitación son uno de los factores con mayor incidencia en el comportamiento de la cobertura vegetal del páramo.

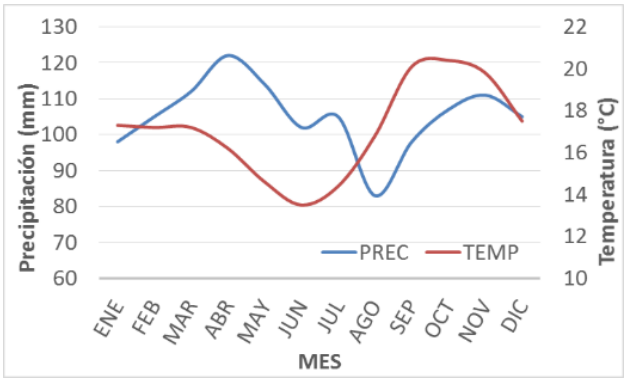


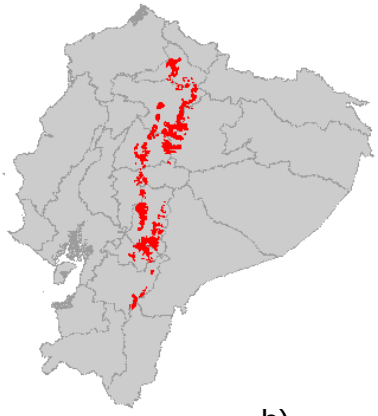




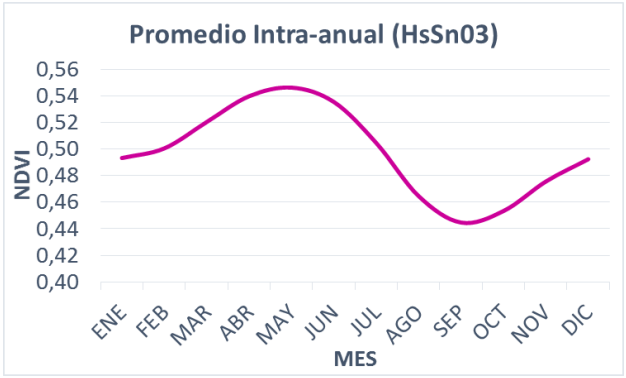
a)

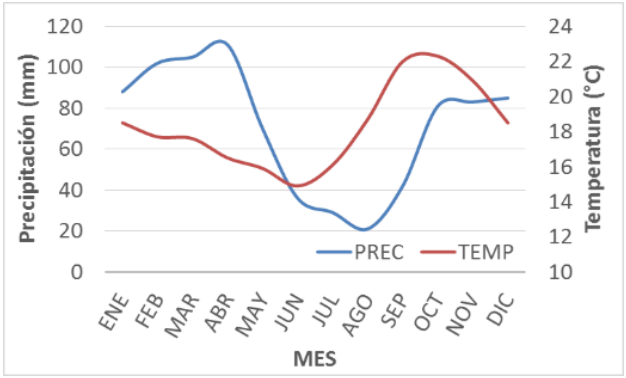

Promedio Intra-anual (HsSn02)
NDVI
0,62
0,60
0,58
0,56
0,54
0,52
0,50
ENE FEB MAR ABR MAY JUN JUL AGO SEP OCT NOV DIC
MES


Precipitación (mm)
Temperatura (°C)
130
120
110
100
90
80
70
60
22
20
18
16
14
12
10
PREC
TEMP
ENE FEB MAR ABR MAY JUN JUL AGO SEP OCT NOV DIC
MES

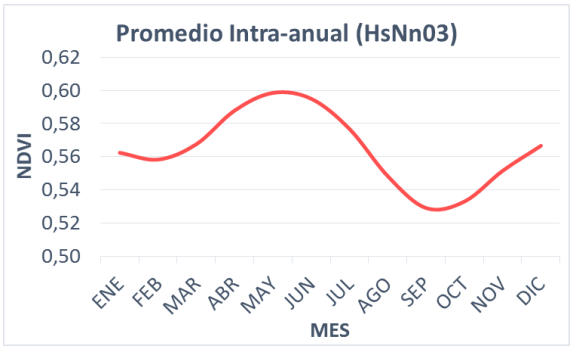


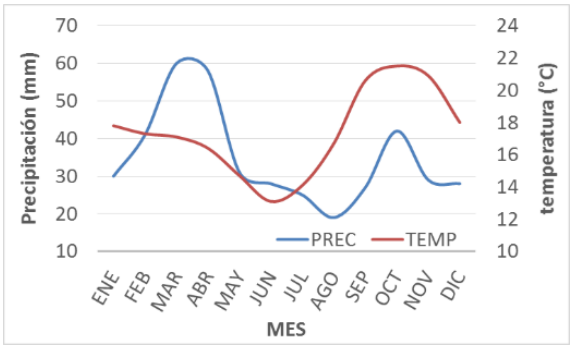
b)

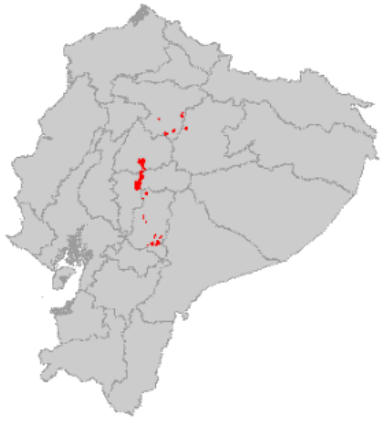

Promedio Intra-anual (HsSn03)
NDVI
0,56
0,54
0,52
0,50
0,48
0,46
0,44
0,42
0,40
ENE FEB MAR ABR MAY JUN JUL AGO SEP OCT NOV DIC
MES


Precipitación (mm)
Temperatura (°C)
120
100
80
60
40
20
0
24
22
20
18
16
14
12
10
PREC
TEMP
ENE FEB MAR ABR MAY JUN JUL AGO SEP OCT NOV DIC
MES

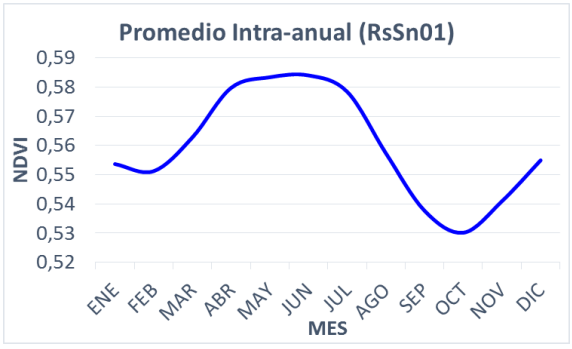
c)

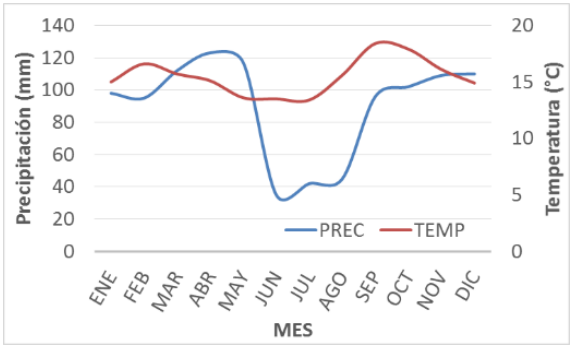


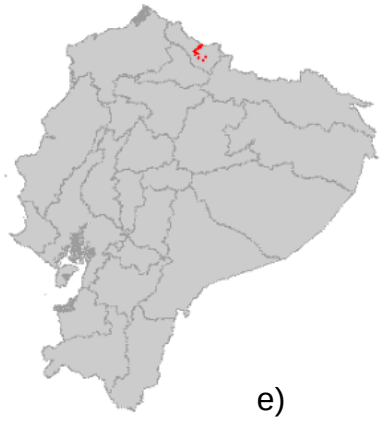




d)







e)

Figura 5.2. Promedio intra-anual de NDVI, precipitación y temperatura de cada ecosistema. a) Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), b) Herbazal del Páramo (HsSn02), c) Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), d) Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y e) Frailejones (RsSn01). Fuente: imágenes satelitales con valores de precipitación y temperatura mundiales. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

La figura 5.3 representa la serie temporal de las anomalías de NDVI promediada espacialmente a partir de todos los ecosistemas en estudio para los 18 años en cuestión. Se puede evidenciar una tendencia positiva de los valores de NDVI a lo largo del tiempo. Esta tendencia se pudo comprobar mediante el uso del test de Mann Kendall al obtener un p-valor menor que el nivel de significancia (0.05), por lo que existe una evidencia estadísticamente significativa de que una tendencia se encuentra presente en los datos de la serie temporal.

Se observa que en años como 2002-2003 y 2006-2007 se desarrollan anomalías negativas (valores por debajo de la media), generadas por una disminución en la precipitación en los Andes a causa del evento del Niño que se suscitó en esas fechas (Vallejo y Ramírez, 2018), causando un alargamiento de la curva hacia la zona negativa que espacialmente se reflejaría en una menor vigorosidad de la vegetación. Mientras que en años como 2008, 2011, 2012 y 2018 sus anomalías son positivas (valores sobre la media) generadas por mayores precipitaciones en la zona andina a causa del fenómeno de La Niña (Vallejo y Ramírez, 2018), lo que conlleva a una contracción de la curva en la zona negativa y una mayor vigorosidad. Esta contracción en las curvas es apreciable en otros años, además de los años con eventos de la Niña, a partir de 2008, año en el cual se produjo un enfriamiento del océano Pacífico a causa de los Patrones Climáticos Globales (PDO negativo), lo cual trajo lluvias a la parte andina del Ecuador (Bendix et al., 2011). Esto es mencionado por Morán-Tejeda et al (2016), el cual registró un incremento de la precipitación en la zona andina entre los años 1966 y 2011, significativo especialmente durante la temporada de lluvias, lo cual justificaría la tendencia positiva de NDVI, mencionada anteriormente.

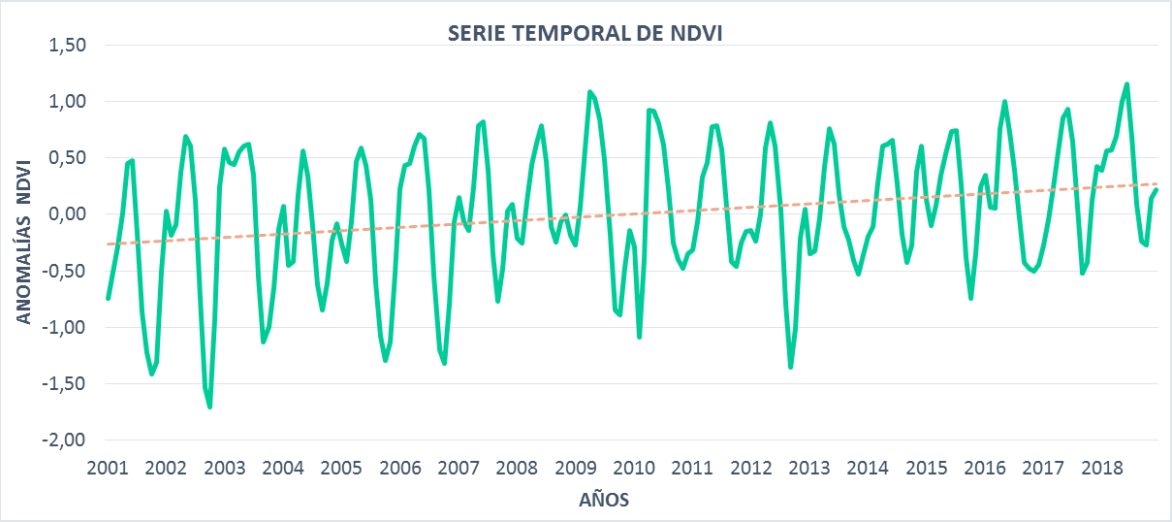


Figura 5.3. Serie temporal de NDVI correspondiente a toda el área de estudio.
Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Un análisis por ecosistema mediante un promedio espacial interanual (figura 5.4), muestra un incremento de NDVI en los años con eventos de La Niña, particularmente marcado en el Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03, línea púrpura) y no tan evidente en los Frailejones (RsSn01, línea azul). Mientras que para años con eventos del Niño no se observa una disminución de los valores, exceptuando el año 2010 en donde sí se aprecia una disminución de la vigorosidad de la vegetación, especialmente marcado en ecosistemas como el HsSn03 o el Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03, línea roja) los cuales se encuentran en el flanco occidental de la cordillera.

Es evidente, además, un ligero incremento en los valores de NDVI a lo largo del tiempo para el HsSn03 con un valor de 0.46 en 2001 y 0.53 en 2018, presentando una pendiente (m) de la línea de tendencia de 0.004, es decir que, en promedio, por cada año que pase se incrementará un 0.004 el valor de NDVI en dicho ecosistema. Mientras que en los ecosistemas restantes se produjo un incremento menor (m_{AsSn01}: 0.003; m_{HsNn03}: 0.003; m_{HsSn02}: 0.002; m_{RsSn01}: 0.002). Esta variación en el aumento de NDVI estaría relacionado entonces con el incremento de la precipitación (barra gris) y la disponibilidad de agua en el páramo. A su vez, las variaciones contrastantes entre curvas nos muestran la diferente respuesta de la vegetación de cada ecosistema a los cambios ambientales.

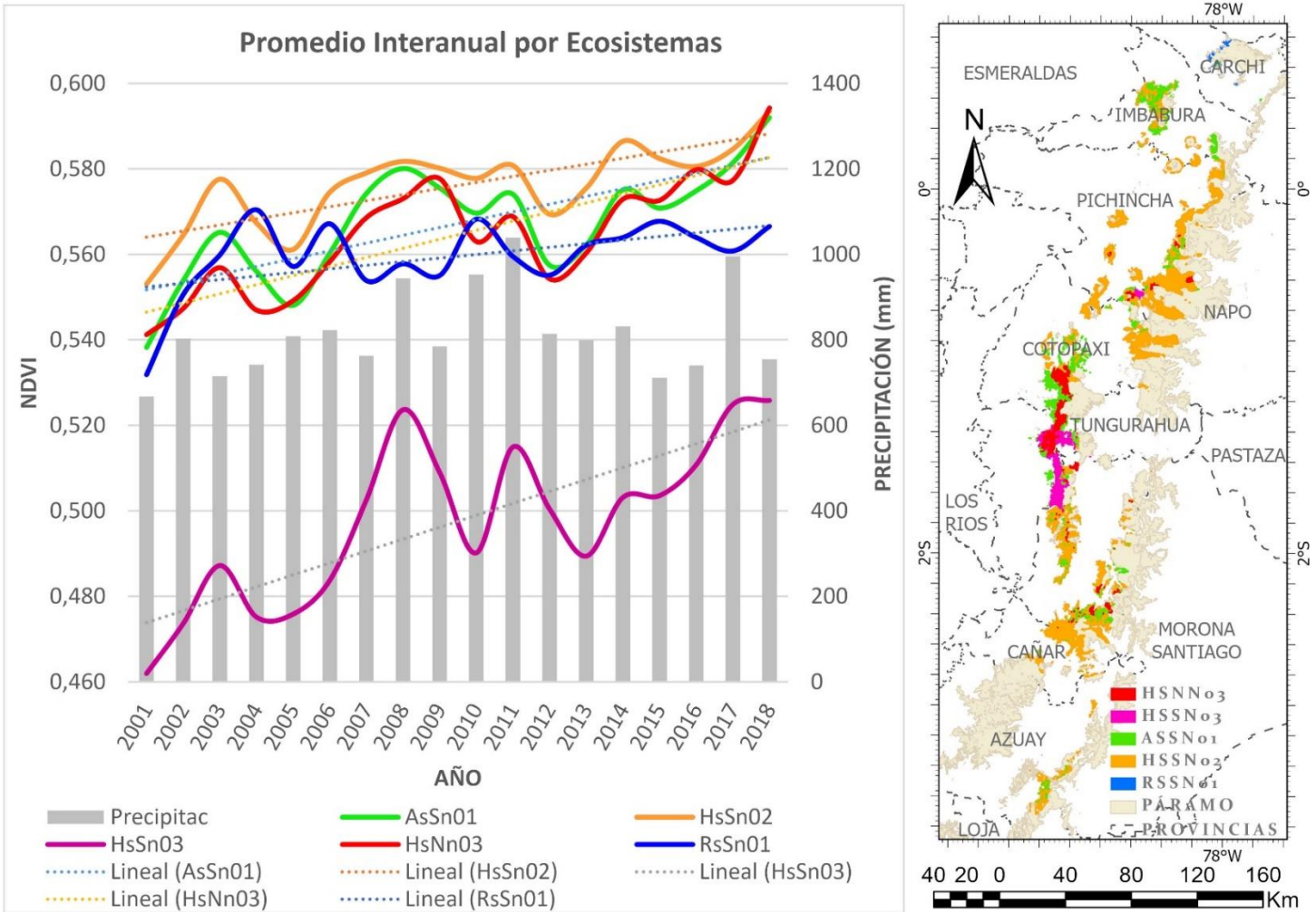
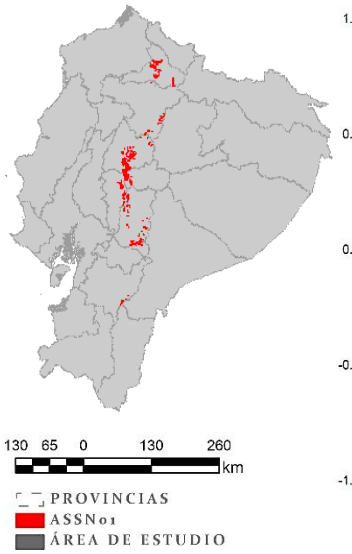


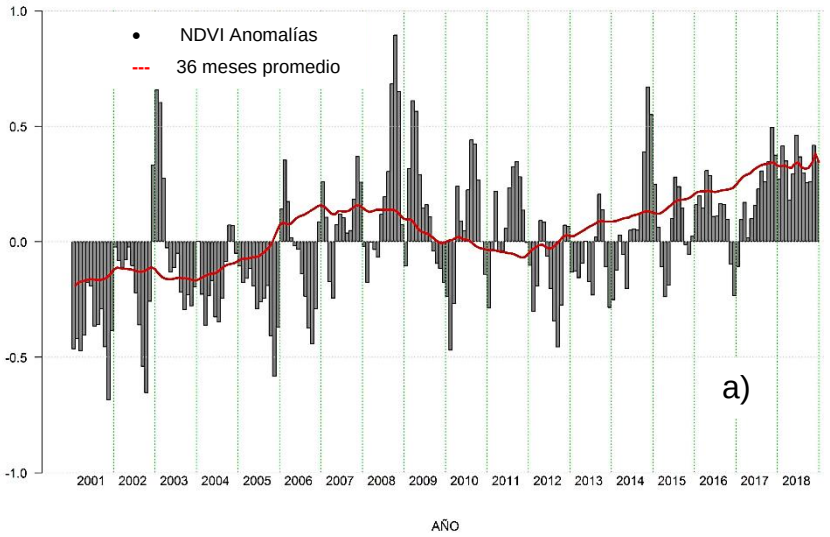
Figura 5.4. Promedio espacial anual de NDVI, para los 18 años de estudio.

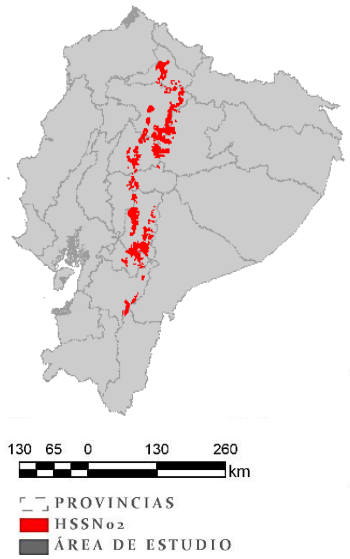
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), Herbazal del Páramo (HsSn02), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y Frailejones (RsSn01). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

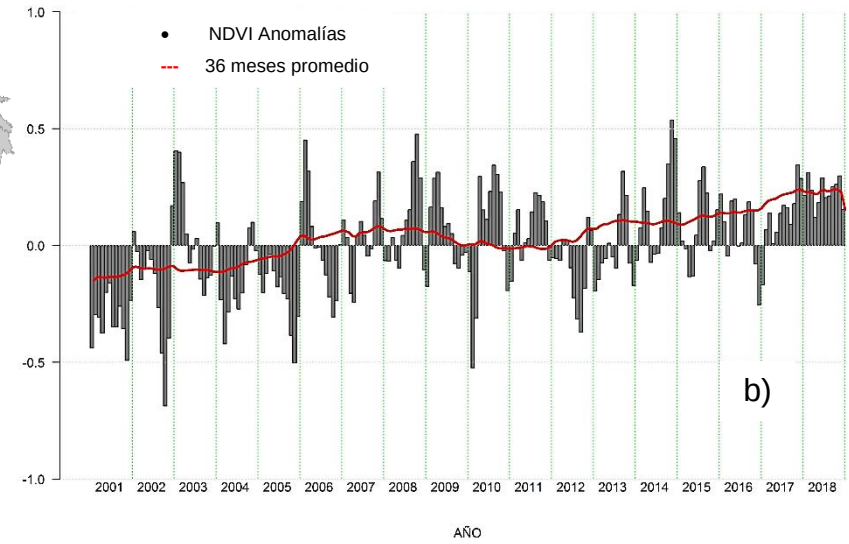
En la figura 5.5 se muestra la media móvil de 36 meses (línea roja) obtenida a partir de la serie temporal de las anomalías mensuales de NDVI (barras grises) para cada ecosistema. Se observa una tendencia positiva de NDVI durante los años 2001-2007 y 2012-2018 y una tendencia negativa entre 2008-2011 en todos los ecosistemas evaluados, exceptuando los Frailejones (RsSn01, figura 5.5e) el cual no presenta ninguna tendencia aparente durante los primeros años hasta el 2012 en donde se registra una ligera tendencia positiva hasta 2018. Esta tendencia negativa entre 2008 y 2011 puede atribuirse a los fenómenos del ENOS registrados en esos años (El Niño en 2010 y La Niña en 2011 y 2012) catalogados de intensidad fuerte y muy fuerte, que alteraron el comportamiento de la vegetación.

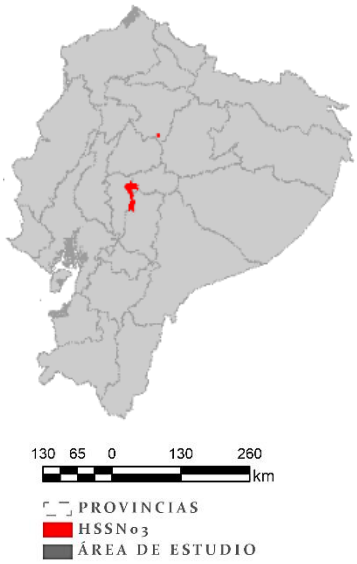
Estos patrones se ven muy marcados para el Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03, figura 5.5c), aproximadamente marcados para el Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01, figura 5.5a), el Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03, figura 5.5d) y Herbazal del Páramo (HsSn02, figura 5.5b); mientras que para el RsSn01 (figura 5.5e), este patrón no se ve reflejado. Esta variación entre ecosistemas puede deberse a la ubicación en la que estos se encuentran. Así, los ecosistemas ubicados al lado occidental de la cordillera, como el HsSn03 y el HsNn03, pueden resultar más influenciados por perturbaciones oceánicas, como El ENOS. Al contrario del RsSn01, ubicado al norte del Ecuador, en donde la influencia puede ser menor. Mientras que el AsSn01 y HsSn02, que se encuentran a lo largo de toda la extensión del páramo, se verían influenciados tanto por perturbaciones de la parte oceánica como amazónica.

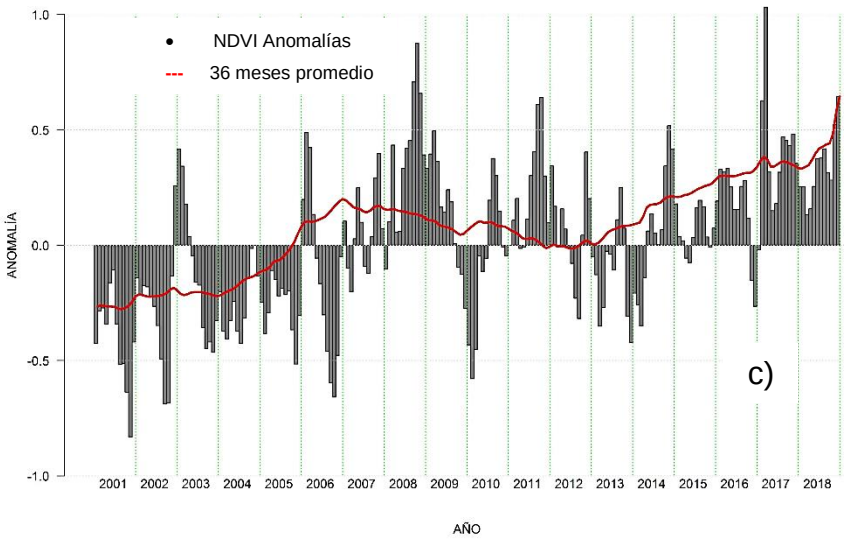

130 65 0 130 260
km
PROVINCIAS
ASSN01
ÁREA DE ESTUDIO

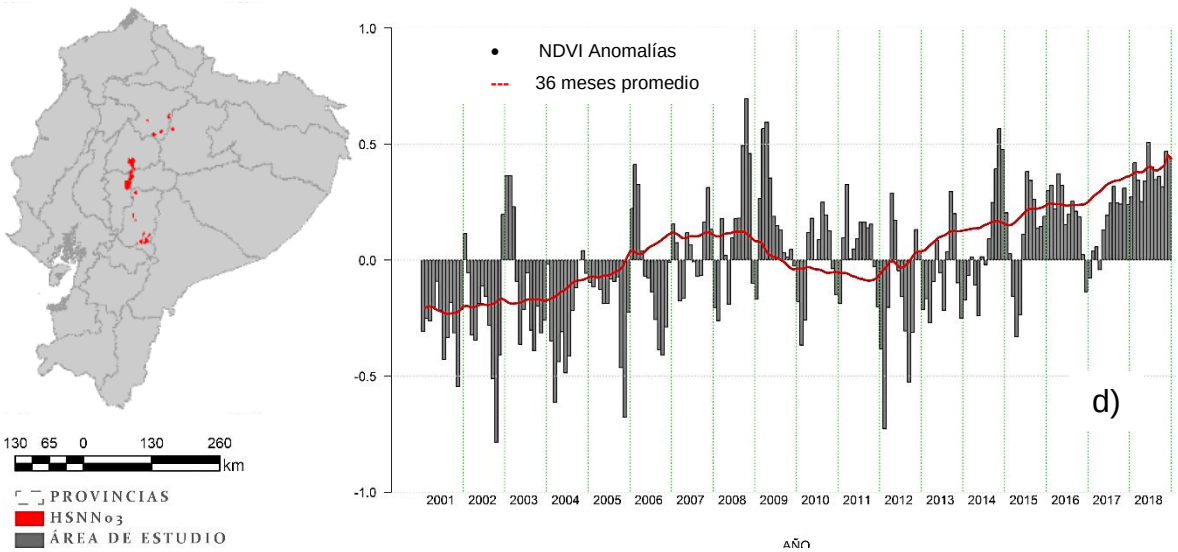

NDVI Anomalías
36 meses promedio
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
AÑO
a)


130 65 0 130 260
km
PROVINCIAS
HSSN02
ÁREA DE ESTUDIO


NDVI Anomalías
36 meses promedio
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
AÑO
b)


130 65 0 130 260
km
PROVINCIAS
HSSN03
ÁREA DE ESTUDIO


NDVI Anomalías
36 meses promedio
ANOMALÍA
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018
AÑO
c)



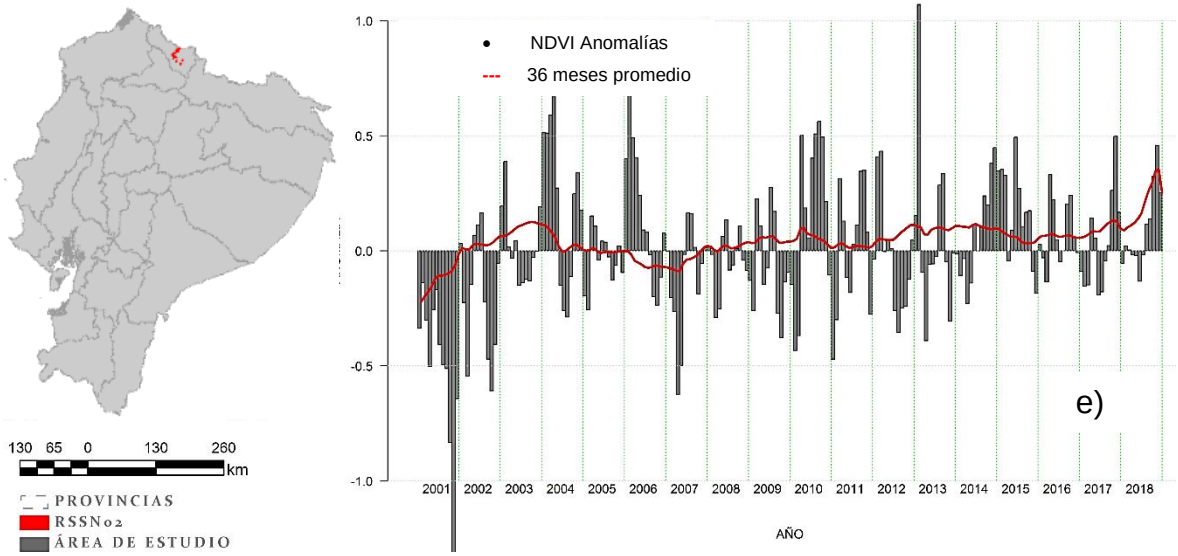


Figura 5.5. Media móvil de 36 meses de anomalías de NDVI para el período 2001-2018. a) Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), b) Herbazal del Páramo (HsSn02), c) Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), d) Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y e) Frailejones (RsSn01). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

La figura 5.6 muestra el coeficiente de variación (CV) promediado espacialmente por mes durante todos los años. Se evidencia la menor variabilidad del NDVI entre marzo-junio (periodo de mayor cantidad de lluvia y vigorosidad de NDVI) y la mayor variabilidad en agosto-septiembre (periodo de menor cantidad de lluvia y vigorosidad de NDVI). Según Buytaert et al., (2006) la elevada nubosidad

que prevalece durante días lluviosos, genera que el nivel de la radiación solar total en la superficie terrestre decrezca, mientras que una elevada humedad relativa en la noche genere una reducción del frío debido a la emisión de radiación de onda larga desde la superficie de la tierra y desde la vegetación. Estos efectos disminuyen la amplitud de la variación climática durante los días de invierno, mientras que un efecto opuesto ocurre durante la época seca.

Además, se observa que el Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03) presenta una alta variabilidad (min: 14% y máx: 21%) en comparación con los ecosistemas restantes. Esto puede deberse a la poca capacidad de retención de agua de este ecosistema, ya que los páramos, en condiciones normales, cumplen la función de almacenadores de agua en época lluviosa que liberan progresivamente en época seca, por lo que este proceso resultaría alterado. Esto ocurre debido al tipo de suelo y la vegetación fragmentada (suelo desnudo con parches de vegetación) y poco resiliente de este ecosistema que impide la retención del agua en el suelo, ya que como menciona Hofstede (1997), “la presencia de una capa de plantas en el suelo es importante para mantener una buena retención de agua durante las épocas secas”.

Contrariamente, el ecosistema con la menor variabilidad (min: 9% y máx: 12%) durante todos los meses es el de los Frailejones (RsSn01) debido a la protección que ofrecen las zonas agrietadas del volcán Chiles a la vegetación y a la humedad del suelo. “Sus suelos son permeables, con porosidad intergranular lo que facilita el flujo de agua a través del suelo logrando que estos se encuentren bien drenados” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, p.138). Esto nos muestra la relación inversa que existe entre la variabilidad de la vegetación y la disponibilidad de agua.

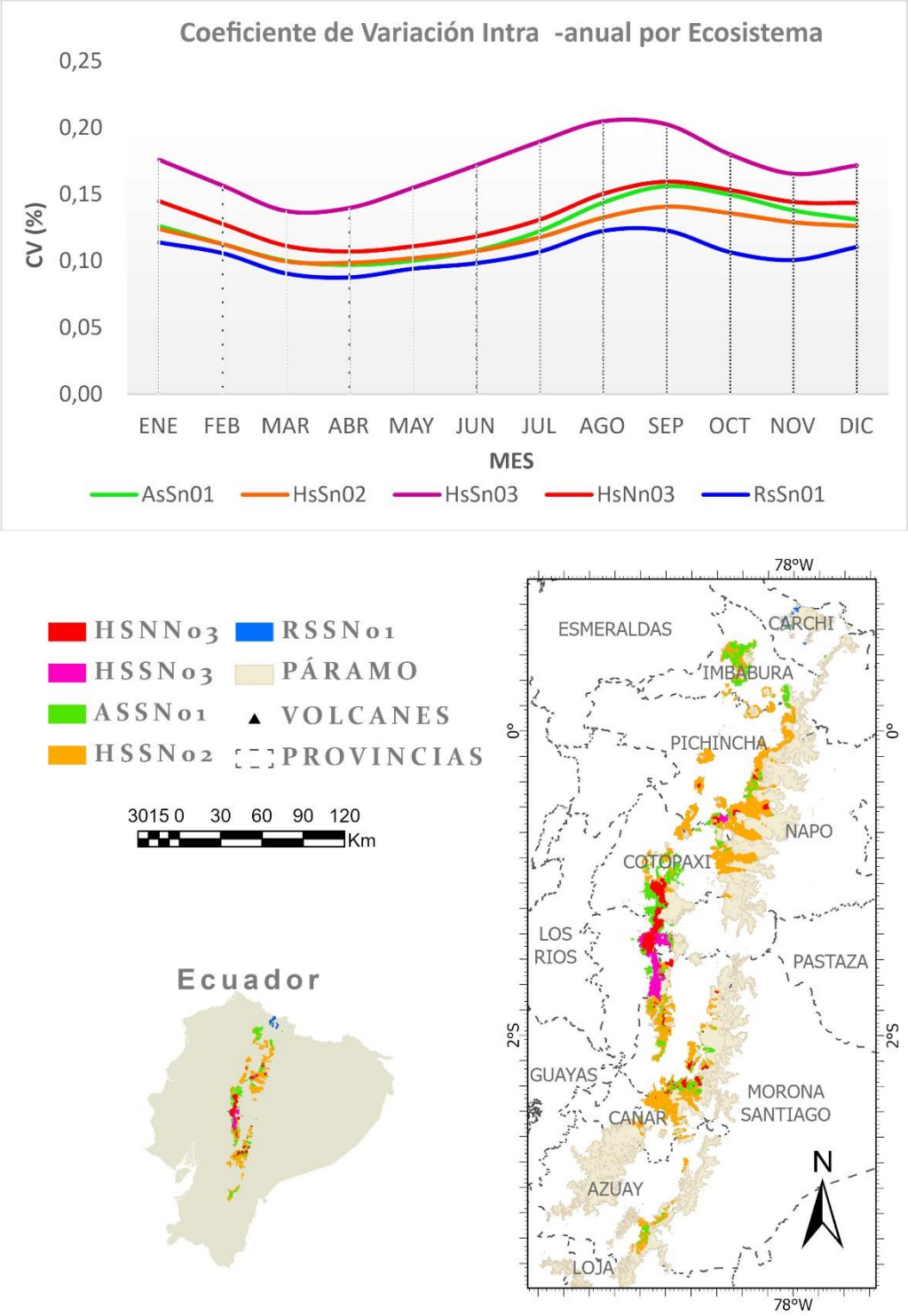


Figura 5.6. Coeficiente de variación intra-anual por ecosistema.
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), Herbazal del Páramo (HsSn02), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y Frailejones (RsSn01). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

La figura 5.7 muestra el CV promediado espacialmente para cada año del período de estudio. Se observa que para los años 2008, 2011 y 2012 (años con presencia de La Niña) se genera una reducción del CV en todos los ecosistemas, mientras que en los años 2003, 2010 y 2016 (años con presencia del Niño) los valores del CV aumentan, demostrando la relación, que se percibió anteriormente, entre la precipitación y la variabilidad del NDVI. Con respecto al Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03) este posee los valores más altos de CV registrados durante todo el periodo de estudio, mientras que el de los Frailejones (RsSn01) los valores más bajos.

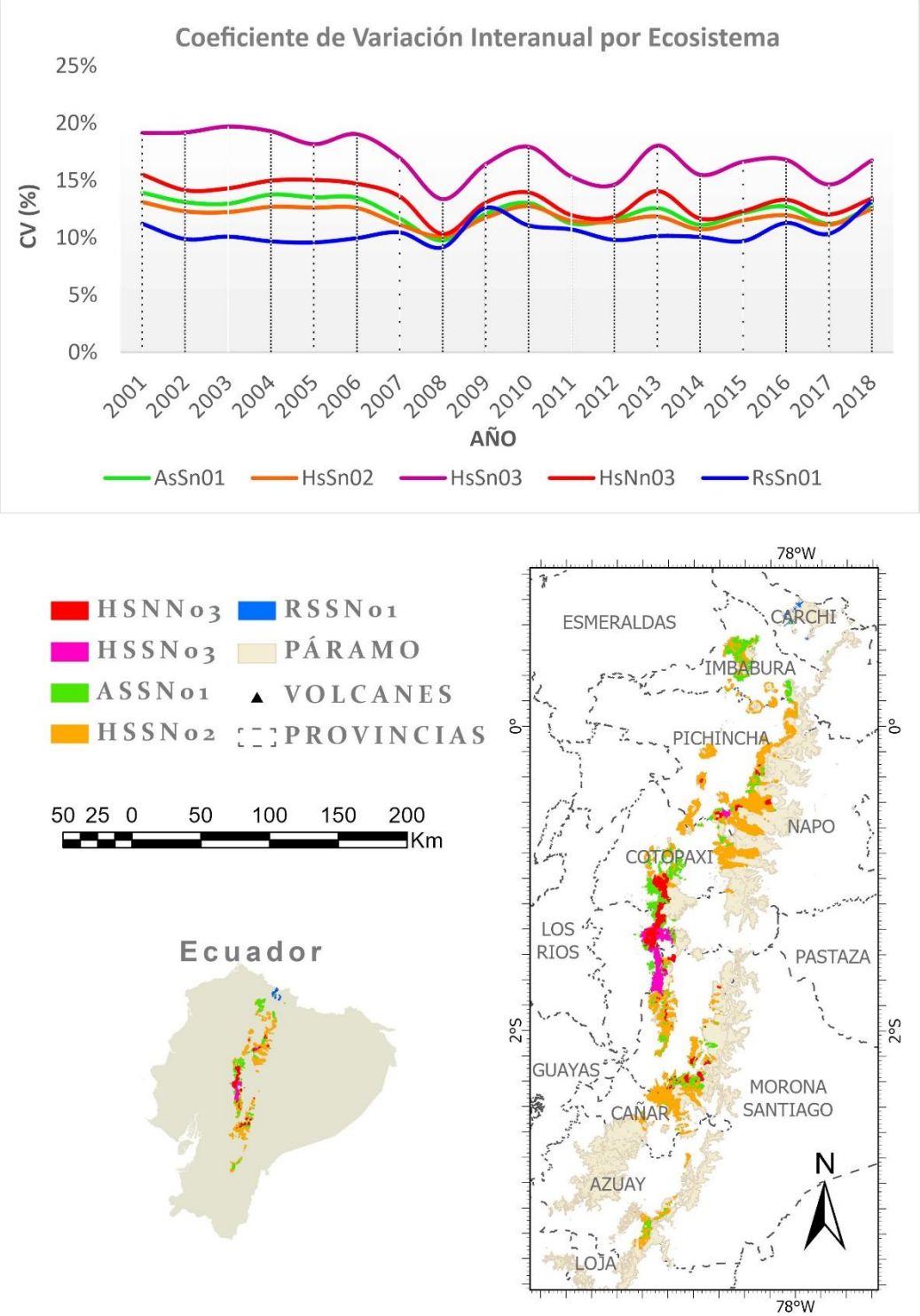


Figura 5.7. Coeficiente de variación interanual por ecosistema.
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), Herbazal del Páramo (HsSn02), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) y Frailejones (RsSn0). Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

5.2 ANÁLISIS ESPACIAL

En la figura 5.8 se presenta el promedio temporal del NDVI por pixel. Se registra una media de 0.5, un máximo de 0.78 y un mínimo de 0.16. Además, se observa una variabilidad en el NDVI en toda la extensión del páramo que puede ser explicada por la dinámica de la precipitación en esta zona. A pequeña escala, la variabilidad de la lluvia se encuentra determinada por la velocidad y dirección del viento, que a su vez se ve influenciado por las pendientes fuertes y la topografía accidentada del terreno (Buytaert et al., 2006). Esto explicaría que en un mismo ecosistema se tengan valores de NDVI variables, como en las zonas fragmentadas de volcán Chiles, Chimborazo, Antisana y Cotopaxi (Carrera de la Torre, 1983). Estas zonas protegen a la vegetación y permiten la captación de agua en el suelo, con lo cual los valores de NDVI son más elevados que los de su alrededor.

A gran escala, la precipitación se ve influenciada por la altitud y latitud. Los picos altitudinales de la precipitación en las laderas del lado este y oeste de los Andes disminuyen con el incremento de la elevación. Esto es evidente en el Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03) al encontrarse a una altura mayor y registrar menores precipitaciones durante todo el año, en comparación con el resto de ecosistemas. Mientras que en las laderas internas de los Andes se generan efectos de sombra de lluvia, generados por los vientos de la Amazonía y de la costa del Pacífico que pierden humedad al cruzar la cordillera (Buytaert et al., 2006). Adicionalmente, la cordillera oriental recibe humedad casi permanente de la Amazonía, mientras que para la occidental contribuyen tanto la corriente cálida del Niño como la fría de Humboldt, ocasionando que el norte del Ecuador tienda a ser húmedo y el sur más seco (León-Yánez, 2000, Buytaert et al., 2006).

Esto explicaría que el páramo del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas en Imbabura posea valores altos de NDVI (entre 0.5 y 0.6) mientras que páramos en la zona del Chimborazo registren valores bajos (entre 0.3 y 0.4), a pesar de encontrarse en el mismo lado de la cordillera occidental. En contraste con páramos ubicados al norte de la cordillera oriental, como los del volcán Cayambe y Antisana y páramos ubicados al sur, en la zona limítrofe entre las provincias de Azuay, Morona Santiago y Zamora Chinchipe, en la que ambos poseen valores altos entre

0.6 y 0.7. Mientras que al sur, en el páramo ubicado dentro del Parque Sangay, entre las provincias de Chimborazo y Cañar, se registra valores entre 0.4 y 0.5 en el flanco occidental y valores entre 0.5 y 0.6 en el flanco hacia la Amazonía.

Sin embargo como menciona Mena et al., (2000), lo que concede al suelo una humedad permanente, además de la cantidad de lluvia, es la precipitación oculta u horizontal (neblina, lloviznas, etc.) la cual es capturada por la vegetación. Además, el tipo de suelo en este proceso es fundamental. El andosol vítrico, ubicado en las laderas del Pichincha y sobre los páramos del Cotopaxi y Chimborazo, posee una granulometría muy arenosa, que con la influencia del viento (vientos costeros fuertes de escasa humedad que producen un microclima árido y forman la zona del Arenal en el Chimborazo), producen una erosión lineal y regresiva. Esto dificulta la retención de agua que se reduce aún más con las pocas especies con mecanismos de adaptación resistentes a estas condiciones climáticas (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2013), generando bajos valores de NDVI. Mientras que tipos de suelo como el andosol alofánico, ubicados en el páramo de Pallatanga (carretera Riobamba-Bucay), al oeste de la provincia de Chimborazo, poseen una alta capacidad de retención de agua, poros estables y un excelente soporte para el crecimiento vegetal, lo cual induce al incremento del verdor de la vegetación, registrando valores de NDVI entre 0.5 y 0.7 (Mena et al., 2000).

Al realizar un análisis por ecosistema observamos que las comunidades de plantas del Herbazal del Páramo (HsSn02) y el Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01), las cuales se extienden a lo largo de todo el páramo, tanto en la cordillera oriental como occidental, crean asociaciones diferentes entre ellas para hacer frente a la disminución de humedad Ramsay (1992). Mientras que para los Frailejones (RsSn01), Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03) y Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (HsNn03), que se encuentran mayormente en una sección en particular del páramo, su vegetación es más específica y adaptable a las condiciones exclusivas de esas zonas (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2013).

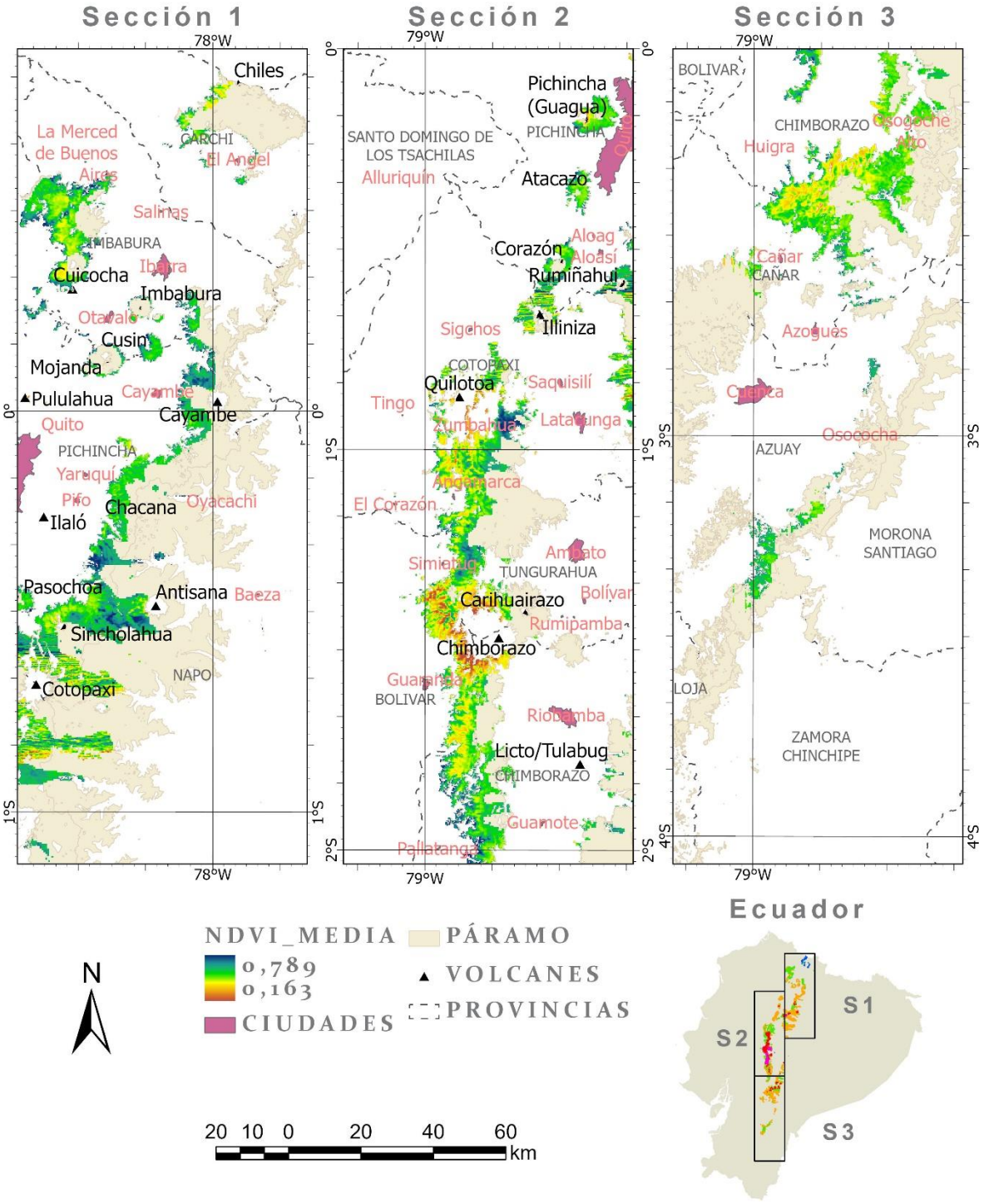


Figura 5.8. Promedio temporal del NDVI reflejado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

La variabilidad espacial intra-anual (Anexos 3), obtenida a través de un promedio de cada mes de todos los años, muestra el ciclo estacional característico de la región, teniendo en los meses de enero-mayo y octubre-diciembre una vegetación más vigorosa a causa del aumento de precipitaciones relacionado con la bimodalidad de la lluvia. En contraste, en los meses de junio-septiembre la vegetación pierde vitalidad. Esto se ve reflejado principalmente en la cordillera occidental de los Andes, a causa de la reducción en las lluvias concerniente a la estación de verano o seca de la región. La figura 5.9 muestra la representación espacial del área de estudio para el mes con mayor y menor vigorosidad (mayo y septiembre, respectivamente). Se aprecia una disminución del NDVI principalmente en el páramo al norte del volcán Cotopaxi, al sur del volcán Quilotoa, en el páramo del Chimborazo, en la zona de Pallatanga y el páramo del Parque Sangay, mientras que el resto del área de estudio presenta cambios leves.

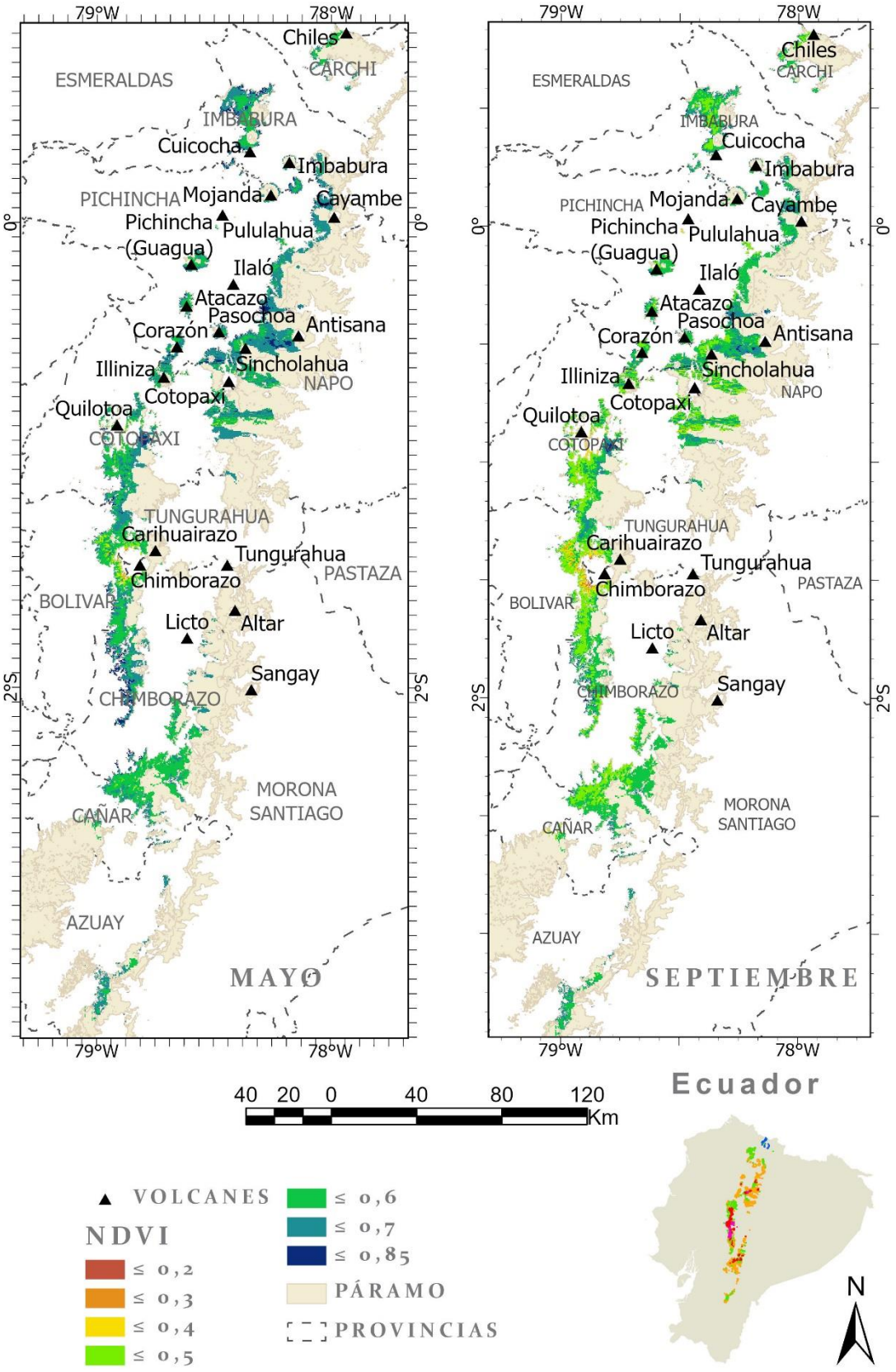


Figura 5.9. Promedio de todos los meses de mayo y septiembre del periodo de estudio.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la siguiente figura se encuentra representado el valor promedio de NDVI para los 18 años de estudio y el coeficiente de variación, para toda la extensión del páramo en estudio. Podemos observar que las zonas con mayor vigorosidad de la vegetación durante el año varían en menor magnitud (0.04 - 0.07 o 4-7%), en comparación con las zonas en donde se registra una menor vigorosidad, en donde la variabilidad aumenta (0.15 - 0.40 o 15 - 40%). Esto es apreciable en el flanco izquierdo de la cordillera occidental, principalmente al oeste del volcán Quilotoa y en el páramo del volcán Chimborazo; y al oeste de la cordillera oriental en los páramos del volcán Cotopaxi que registran valores que oscilan entre 0.20 - 0.40 o 20 - 40%. Mientras que las zonas del volcán Cayambe, Antisana y el sureste del volcán Quilotoa poseen la menor variabilidad registrando valores entre 0.04 - 0.05 o 4-5%.

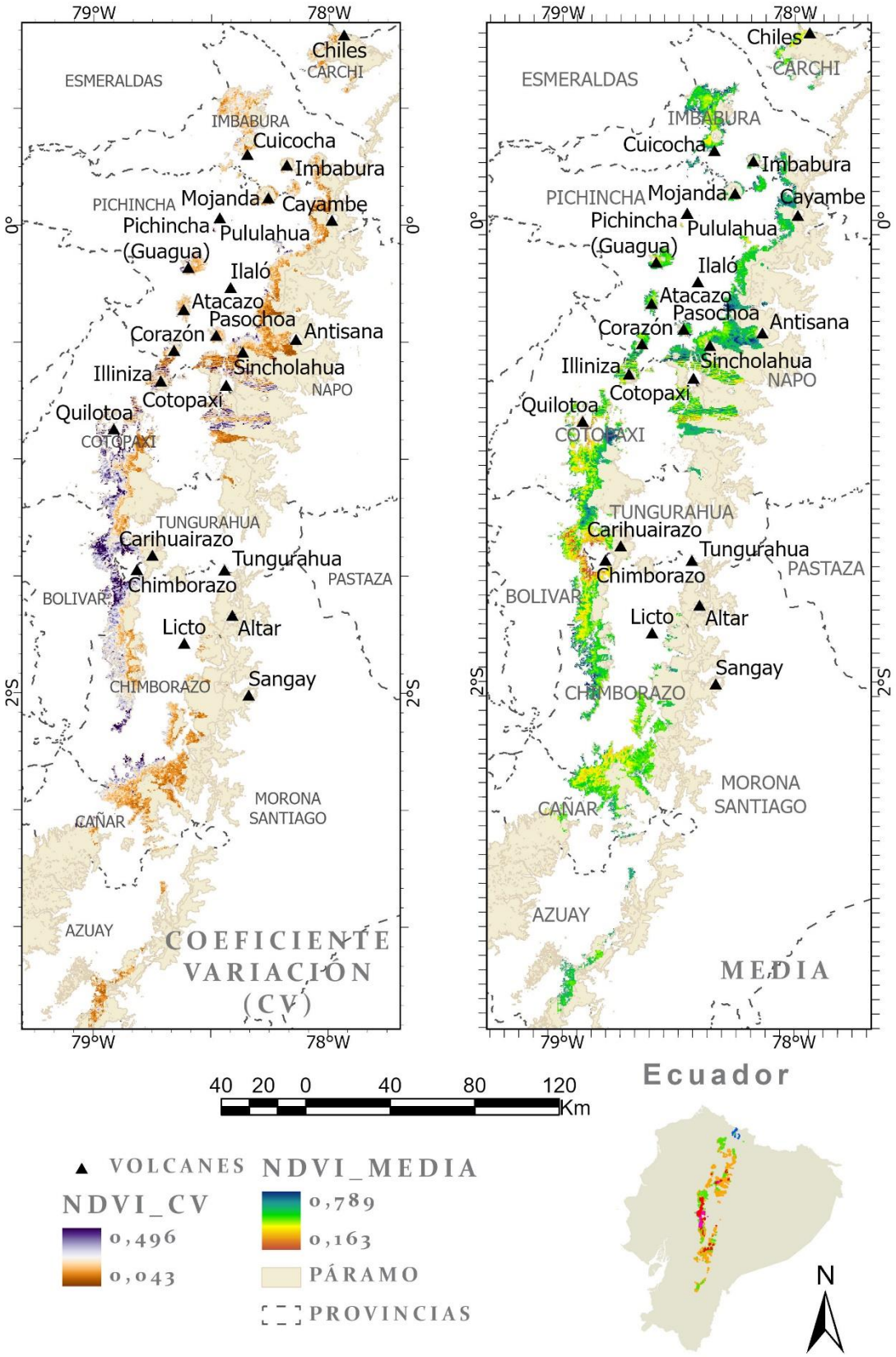


Figura 5.10. Relación entre el coeficiente de variación (CV) y el NDVI.
En la derecha se muestra los valores medios de NDVI, mientras que en el lado izquierdo se ubican los valores de CV. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

5.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL

Las figuras 5.11 y 5.12 muestran la serie temporal de NDVI promedio del ecosistema en el que recaen los sitios de interés escogidos en contraste con la serie temporal de cada punto de interés. Se tiene cuatro puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad dentro del análisis anteriormente desarrollado, espacial y temporal (Frailejones, Antisana, Chimborazo y Pallatanga, figura 5.11) y cuatro puntos de acuerdo a su ubicación geográfica (Cotacachi al norte, Sangay al sur, Cotopaxi al este y Quilotoa al oeste, figura 5.12).

La serie temporal de NDVI posee un comportamiento oscilatorio con una amplitud entre 0.50-0.65. El punto de Cotopaxi posee el mismo comportamiento que la serie de NDVI pero con una amplitud mayor (entre 0.35-0.70), mientras que el de Chimborazo posee un comportamiento similar pero con valores más bajos en toda la serie temporal (amplitud entre 0.35-0.55). Los puntos de Cotacachi, Pallatanga y Antisana registran un comportamiento y amplitud similar a la serie de NDVI con algunas oscilaciones mayores o menores a la misma. Además, el punto de Pallatanga registra una caída de NDVI entre 2012 y 2015 posiblemente por la influencia de eventos de La Niña ocurrido en 2011 y 2012. Mientras que los puntos ubicados en los Frailejones, Quilotoa y Sangay tienen un comportamiento un poco diferente y con valores ligeramente más elevados (amplitud entre 0.50-0.70) que la serie temporal de NDVI. Eso reflejaría lo complejo de la variabilidad de NDVI ya que a pesar de encontrarse en el mismo ecosistema, en la misma cordillera o en la misma latitud/longitud cada zona posee un comportamiento particular.

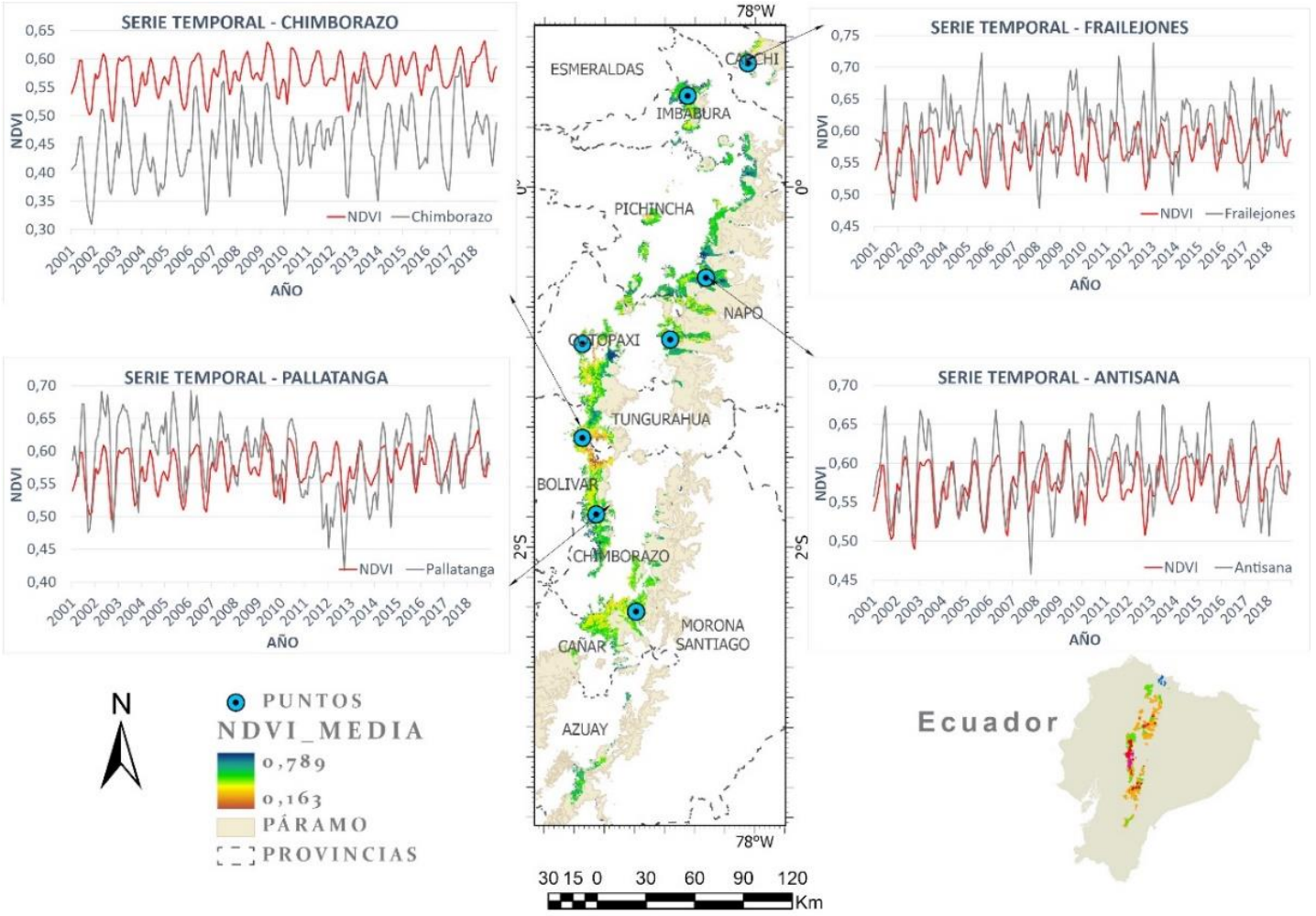


Figura 5.11. Series temporales correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad.

Las líneas grises muestran la serie temporal de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas rojas muestran la serie temporal promedio del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

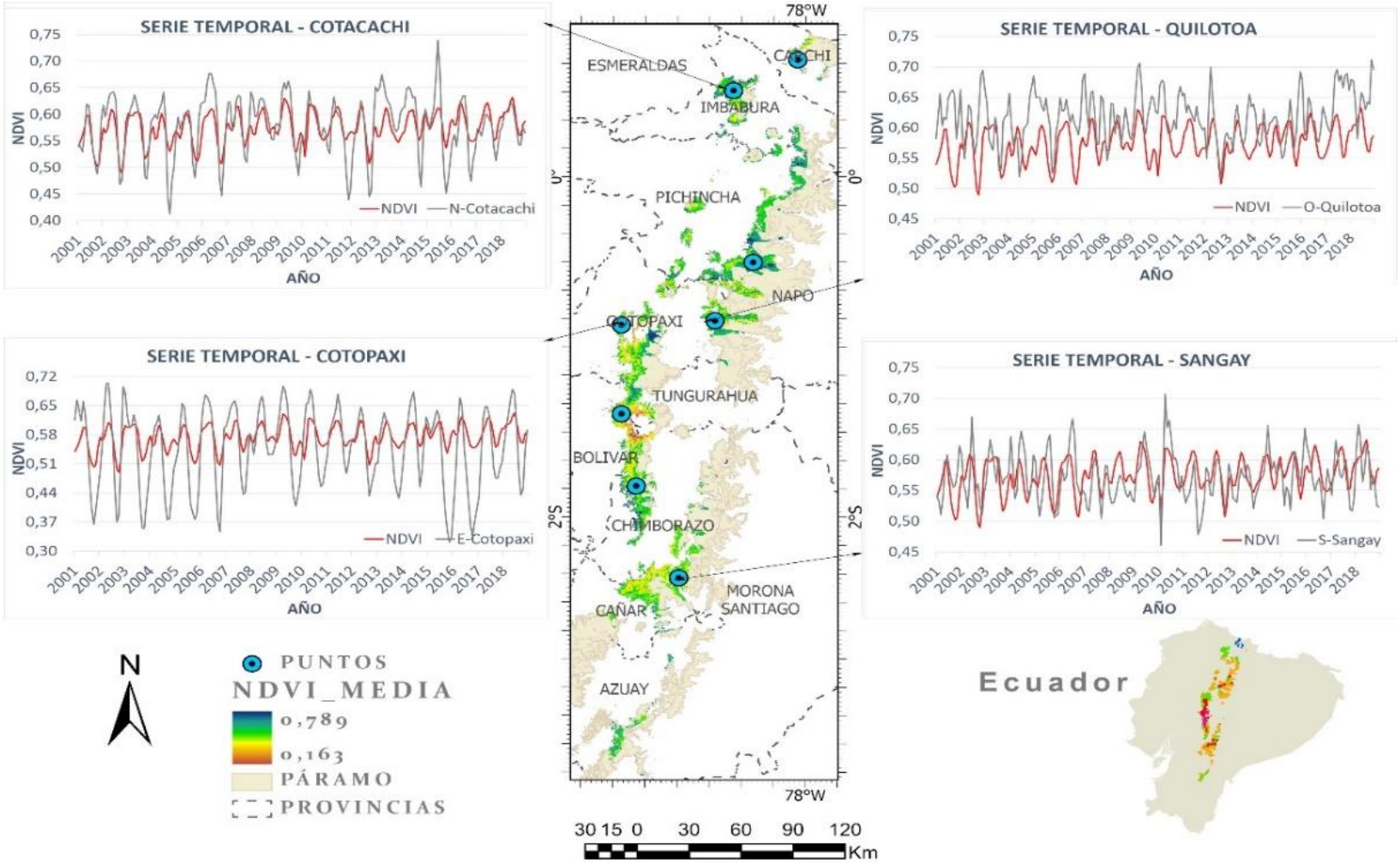


Figura 5.12. Series temporales correspondientes a los puntos relevantes de acuerdo a su ubicación geográfica.
Las líneas grises muestran la serie temporal de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas rojas muestran la serie temporal promedio del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Las figuras 5.13 y 5.14 muestran el promedio interanual de los puntos de interés, mencionados anteriormente, en contraste con el promedio interanual de cada ecosistema al que pertenece dicho punto. Se evidencia que pequeños cambios en el tiempo pueden llegar a ser muy marcados (mayor amplitud) en algunas zonas como Pallatanga, Cotopaxi o Sangay, mientras que otros como el Antisana, reflejan una amplitud similar al promedio de su ecosistema. Se observa además, que si bien a nivel general, en la región interandina, la tendencia del comportamiento del ENOS es un incremento de la vigorosidad en presencia de La Niña y una disminución en presencia del Niño, en algunos puntos como en Pallatanga o Sangay, su comportamiento resulta opuesto a lo que se espera, posiblemente debido a que son ecosistemas más expuestos al encontrarse a una menor altitud en la cordillera occidental, por lo tanto se evidencia que para un mismo ecosistema la influencia de los PCG puede ser variada.

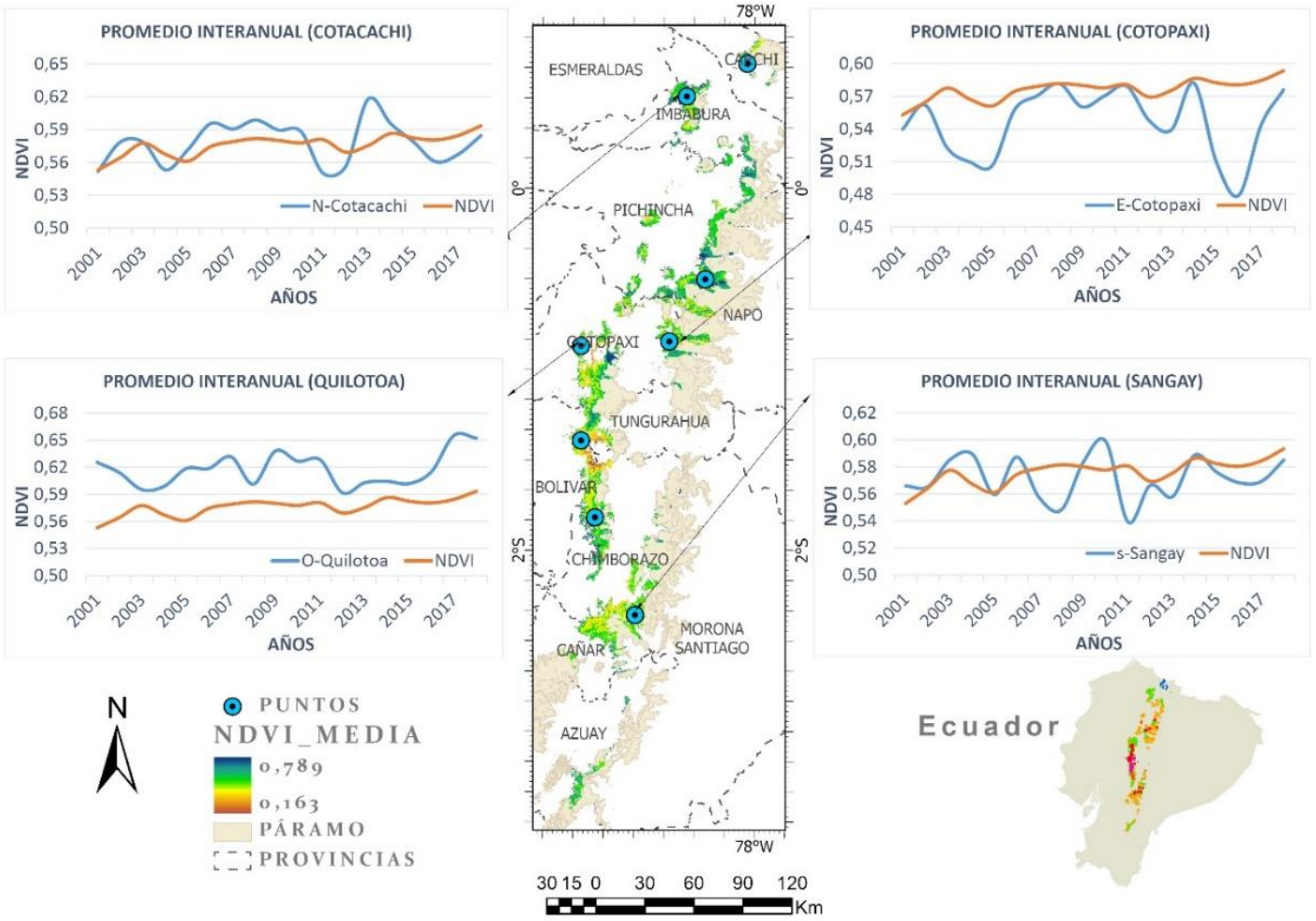


Figura 5.13. Promedio interanual correspondientes a los puntos relevantes por su ubicación geográfica.

Las líneas azules muestran el promedio interanual de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas cafés muestran el promedio interanual del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

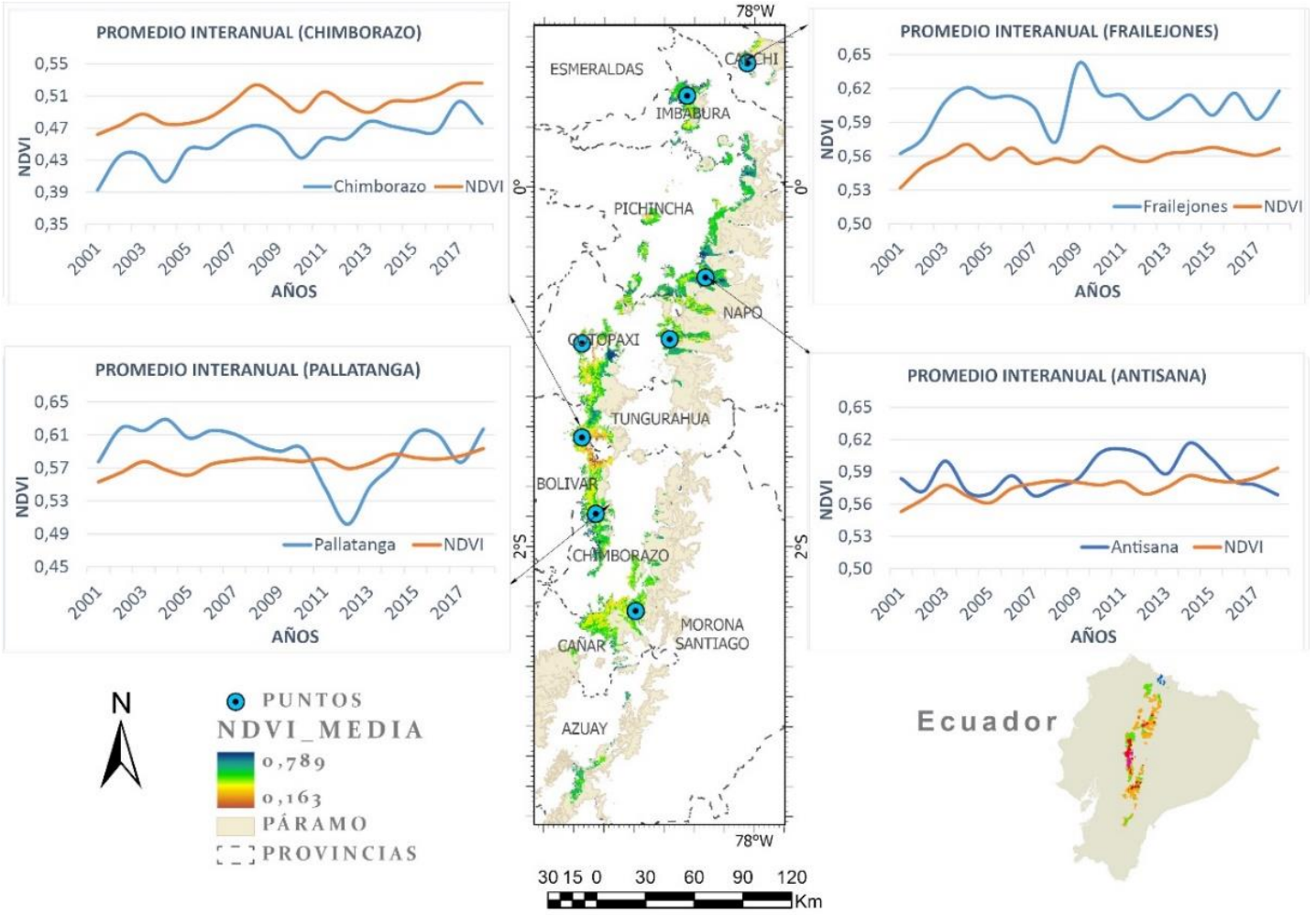


Figura 5.14. Promedio interanual correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad.

Las líneas azules muestran el promedio interanual de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas cafés muestran el promedio interanual del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En las figuras 5.15 y 5.16 se muestra el promedio intra-anual de los puntos de interés en contraste con el promedio intra-anual de cada ecosistema al que pertenece ese punto. Con respecto a la temporalidad, se observa que todos se manifiestan de forma similar con respecto a los picos (mayo-junio) y valles (septiembre-octubre), propios de la estacionalidad de la vegetación y precipitación analizados anteriormente, con excepción del punto ubicado en los Frailejones. Además, existen algunas curvas, como la de Pallatanga o Antisana, que más se acercan al comportamiento de la curva su ecosistema, mientras que otras, como la de Cotopaxi o Quilotoa, poseen una amplitud diferente. Esto demuestra que dentro de un mismo ecosistema existe una heterogeneidad en cuanto al comportamiento de la vegetación

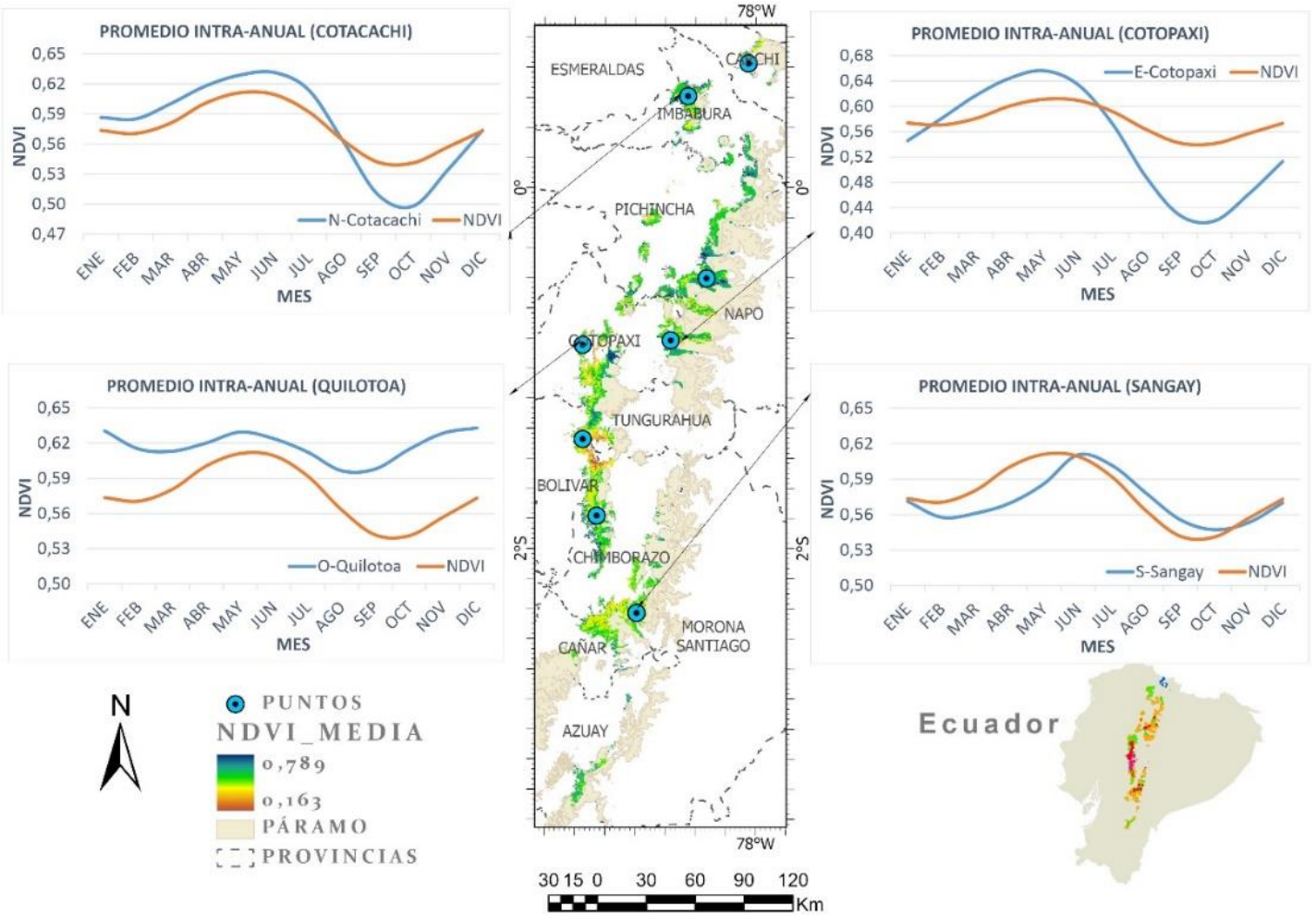


Figura 5.15. Promedio intra-anual correspondientes a los puntos relevantes por su ubicación geográfica.

Las líneas azules muestran el promedio intra-anual de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas cafés muestran el promedio intra-anual del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

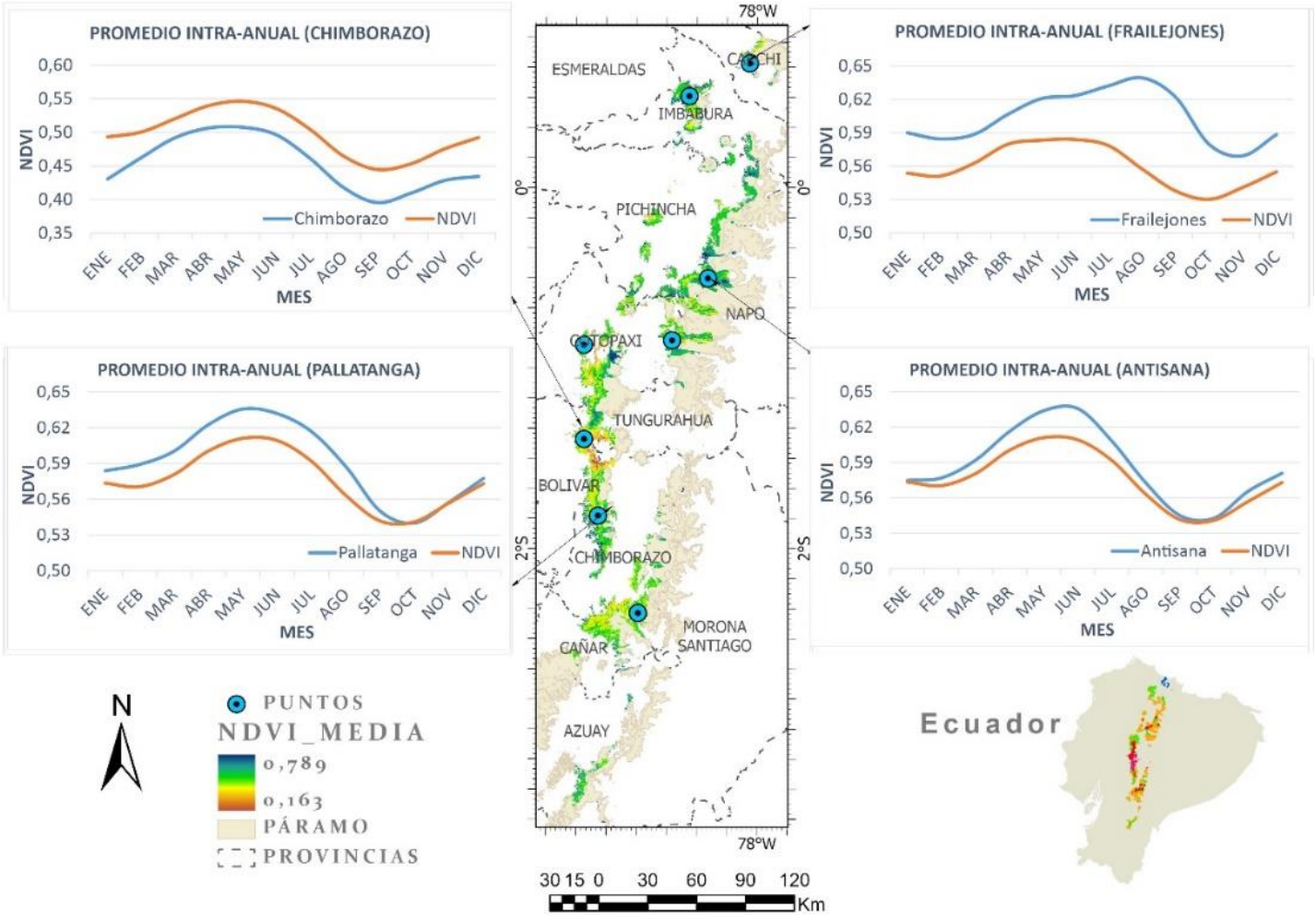


Figura 5.16. Promedio intra-anual correspondientes a los puntos de relevancia de acuerdo a su particularidad.

Las líneas azules muestran el promedio intra-anual de NDVI de 4 puntos de interés. Las líneas cafés muestran el promedio intra-anual del ecosistema en el que recae el punto de estudio. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

5.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE NDVI Y PCG

La variabilidad climática a gran escala puede tener un impacto crítico en el crecimiento de la vegetación tanto a escala local como global. Los resultados, al realizar la correlación entre los Índices de Patrones Climáticos Globales y NDVI a través del coeficiente de correlación de Pearson (*r*), muestran diferencias significativas ($p<0.05$) en la dinámica interanual de NDVI.

En la figura 5.17 se observa que el 23.3% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p < 0.05$) de los cuales el 21.9% muestran una correlación positiva débil ($0.13 < r < 0.31$) entre el índice AAO y NDVI, encontrándose estos pixeles tanto en la cordillera oriental como occidental. Mientras que solo un 1.4% de los pixeles posee una correlación negativa débil ($-0.13 < r < -0.25$), los cuales se encuentran ubicados principalmente en el páramo entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3, figura 5.17).

Un estudio realizado a nivel global por Potter et al. (2008), mostró que existe una correlación débil ($r < 0.5$) entre el AAO y la vegetación de la región con poca significancia, similar a lo obtenido. A nivel regional, no se encontraron estudios de correlación entre el índice AAO y la vegetación, sin embargo, existe información de correlaciones entre el AAO y la precipitación y temperatura en Sudamérica, registrando la ausencia de la misma para la serranía ecuatoriana (Garreaud et al., 2009). A nivel local, se comparó con un estudio elaborado por Ávila (2019) en el que se correlaciona a varios Patrones Climáticos Globales, entre ellos el AAO, con la precipitación en Ecuador, obteniendo una correlación positiva con valores menores a 0.5. A pesar de su poca influencia en los páramos del Ecuador, por la baja cantidad de pixeles significativos y su correlación débil, se ha encontrado estudios (Pohl, 2010; Fogt and Bromwich, 2006; L'Heureux y Thompson, 2006) que demuestran su influencia en el Pacífico central en escala de tiempo interanual, determinando una relación significativa con ENOS durante el verano austral (de diciembre a febrero), es decir, el período del año en el cual las señales asociadas a las condiciones de El Niño y La Niña alcanzan su madurez

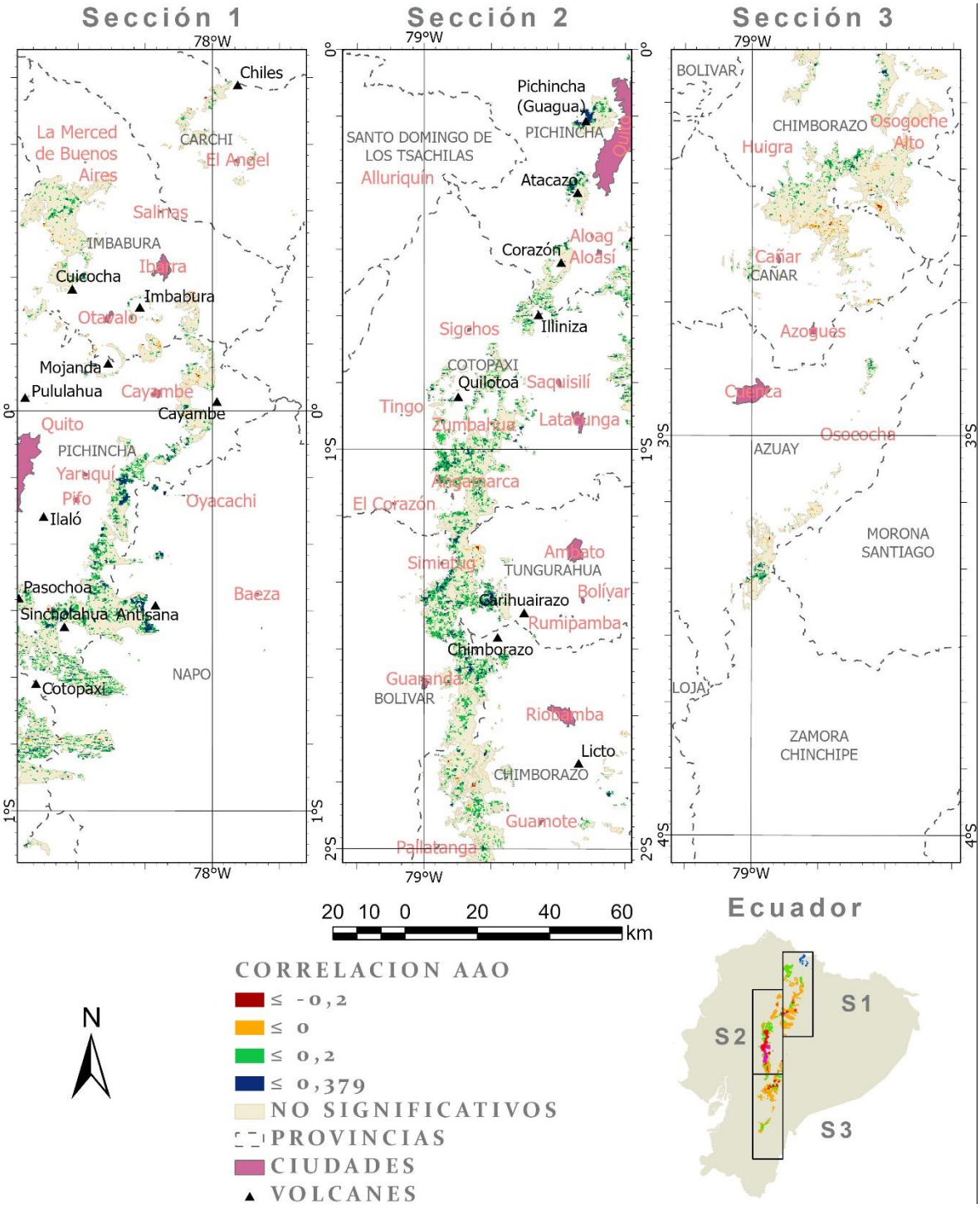


Figura 5.17. Coeficiente de correlación entre NDVI y AAO representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.18 se observa que el 48.6% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 47.5% muestran una correlación positiva débil ($0.13 < r < 0.49$) entre el índice PDO y NDVI, encontrándose ubicados en toda la extensión del páramo, tanto de la cordillera oriental como occidental. Mientras que tan solo un 1.1% de los pixeles registran una correlación negativa débil ($-0.13 < r < -0.25$) los cuales están ubicados principalmente en los páramos entre el volcán Antisana y Sincholahua (Sección 2, figura 5.18) y en el páramo sur entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3, figura 5.18).

De acuerdo a un estudio global en el que se relaciona a PDO con la precipitación y temperatura (Garreaud et al., 2009), se observa que existe una disminución de la precipitación y aumento de la temperatura en la región del Ecuador cuando se tiene la presencia del PDO sobre América del Sur. A nivel local, se obtiene algo similar en el estudio ejecutado por Ávila (2019), al correlacionar la precipitación del Ecuador con el PDO, en la cual se registra una correlación negativa baja ($-0.3 < r < -0.6$) para el sur de la Costa y Amazonía y para el centro de la Sierra. Además, debido a la estrecha relación que guarda el páramo con los glaciares con respecto a la distribución de la precipitación y temperatura (Buytaert y Ramírez, 2012), se comparó con un estudio realizado en los glaciares ecuatorianos en donde se observó que la pérdida masiva de estos es alta durante los eventos de El Niño, que aumenta aún más cuando El Niño se produce durante las fases cálidas del PDO. La situación es opuesta durante La Niña, que es más intensa durante las fases frías de la PDO, reflejando un balance más equilibrado y en algunos casos positivo (Veettil et al., 2014; Basantes et al., 2014).

De acuerdo con la bibliografía y considerando que en los últimos años se ha reflejado una prominencia de eventos de la Niña y de un enfriamiento del Pacifico causado por un PDO negativo, lo cual produce mejores condiciones para la zona Andina (tasas de precipitación más altas, velocidad del viento, albedo y menor temperatura, que hace que el NDVI incremente a lo largo de los años de estudio, observado anteriormente), no se consideraría congruente la obtención de una correlación positiva como la adquirida, sino una negativa, por lo que al no hallarse

una explicación más congruente sobre estos valores, dicha área requerirá especial atención en investigaciones futuras.

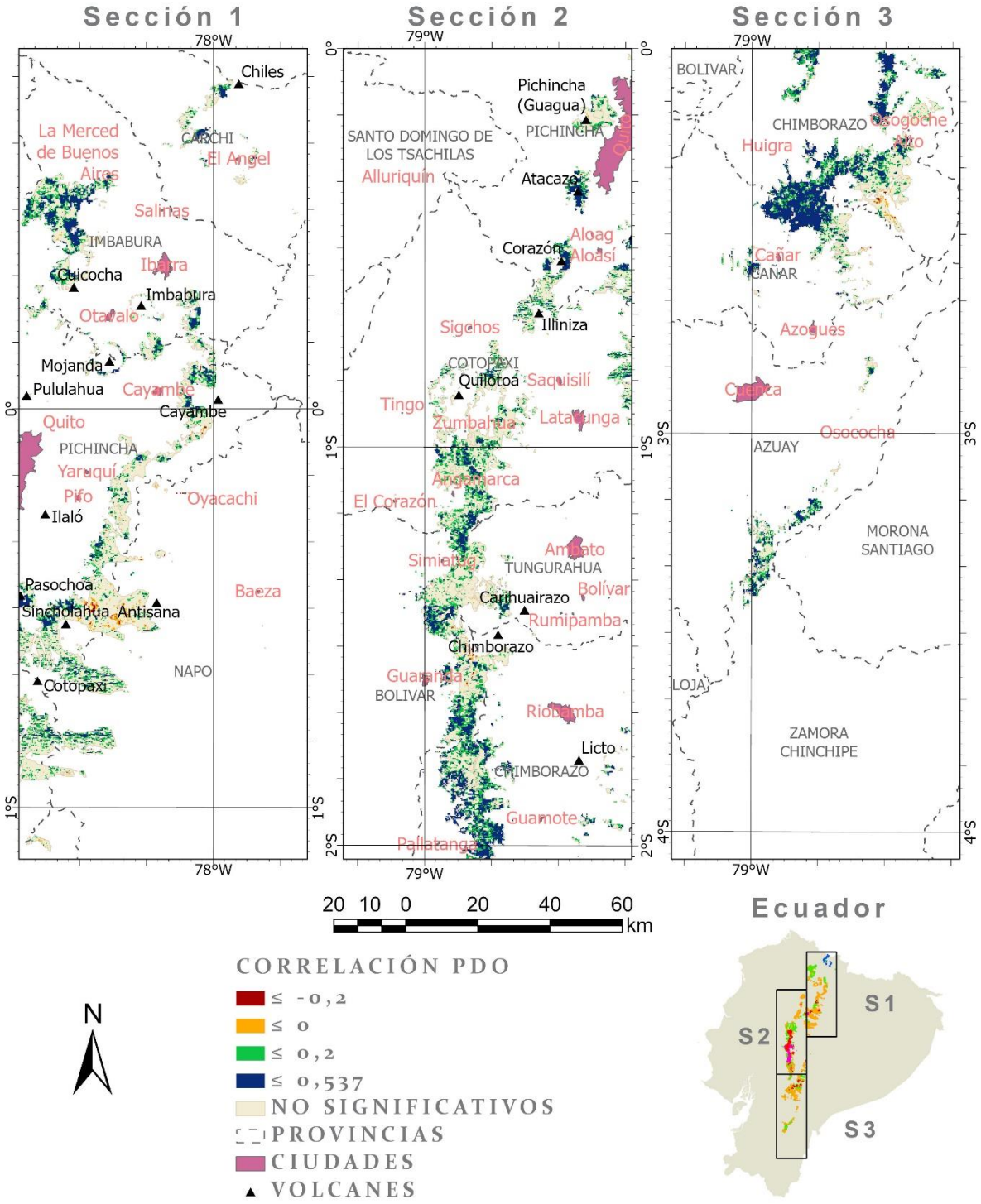


Figura 5.18. Coeficiente de correlación entre NDVI y PDO representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Con respecto a la figura 5.19, se observa que el 37.1% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 32.4% muestran una correlación débil e inversamente proporcional ($-0.14 < r < -0.44$) entre el índice MEI y NDVI, ubicados tanto en la cordillera oriental como occidental. Contrariamente, un 4.7% de los pixeles registran una correlación débil directamente proporcional ($0.12 < r < 0.33$) los cuales se ubican principalmente en el páramo del este de la provincia de Imbabura (Sección 1, figura 5.19), en el volcán Atacazo y en el páramo entre las provincias de Cotopaxi y Tungurahua (Sección 2, figura 5.19) y en el páramo ubicado entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3, figura 5.19).

Estudios a nivel regional (Garreaud et al., 2009), en los que relacionan al índice MEI con la precipitación y temperatura en América del Sur, registran una disminución en la precipitación y un aumento en la temperatura en presencia de este fenómeno. De acuerdo con los estudios de Poveda et al., (2002) y Gutiérrez et al., (2013) realizados en Colombia, se observa una correlación negativa estadísticamente significativa entre el índice MEI y la precipitación y caudales, con valores entre -0.45 y -0.55.

A nivel local, en un estudio elaborado por Ávila (2019), en el que correlaciona el MEI con la precipitación de todo el territorio ecuatoriano, se registra una correlación negativa ($-0.3 < r < -0.6$) para toda la región Sierra y parte de la costa ecuatoriana, además, menciona que los índices con más incidencia que el MEI en la región sierra son El Niño1+2 y El Niño4. Mientras que en un estudio (Vallejo y Ramírez, 2018) realizado en el páramo del norte del país, se registró una correlación baja entre el índice MEI y el índice de vegetación EVI, atribuyéndolo a las diferentes variables que se utilizan para la obtención del MEI (océano-atmosféricas) y EVI (fisiológicas). Mientras que las correlaciones obtenidas con la precipitación, demostraron que La Niña influye en el incremento de las lluvias de la región interandina, sucediendo lo contrario con el evento del Niño. Algo similar es obtenido por Maita (2015) en donde se observa que la serie temporal del índice EVI para la vegetación del páramo del sur del Ecuador tiene un comportamiento similar al índice MEI que describe al ENOS. Estos resultados nos demuestran que existe una correlación inversa entre el MEI y la vegetación del páramo, es decir, que con

valores positivos de MEI (El Niño) se espera, en promedio, una disminución del verdor de la vegetación, mientras que con valores negativos (La Niña) se esperaría un aumento del vigor de la misma.

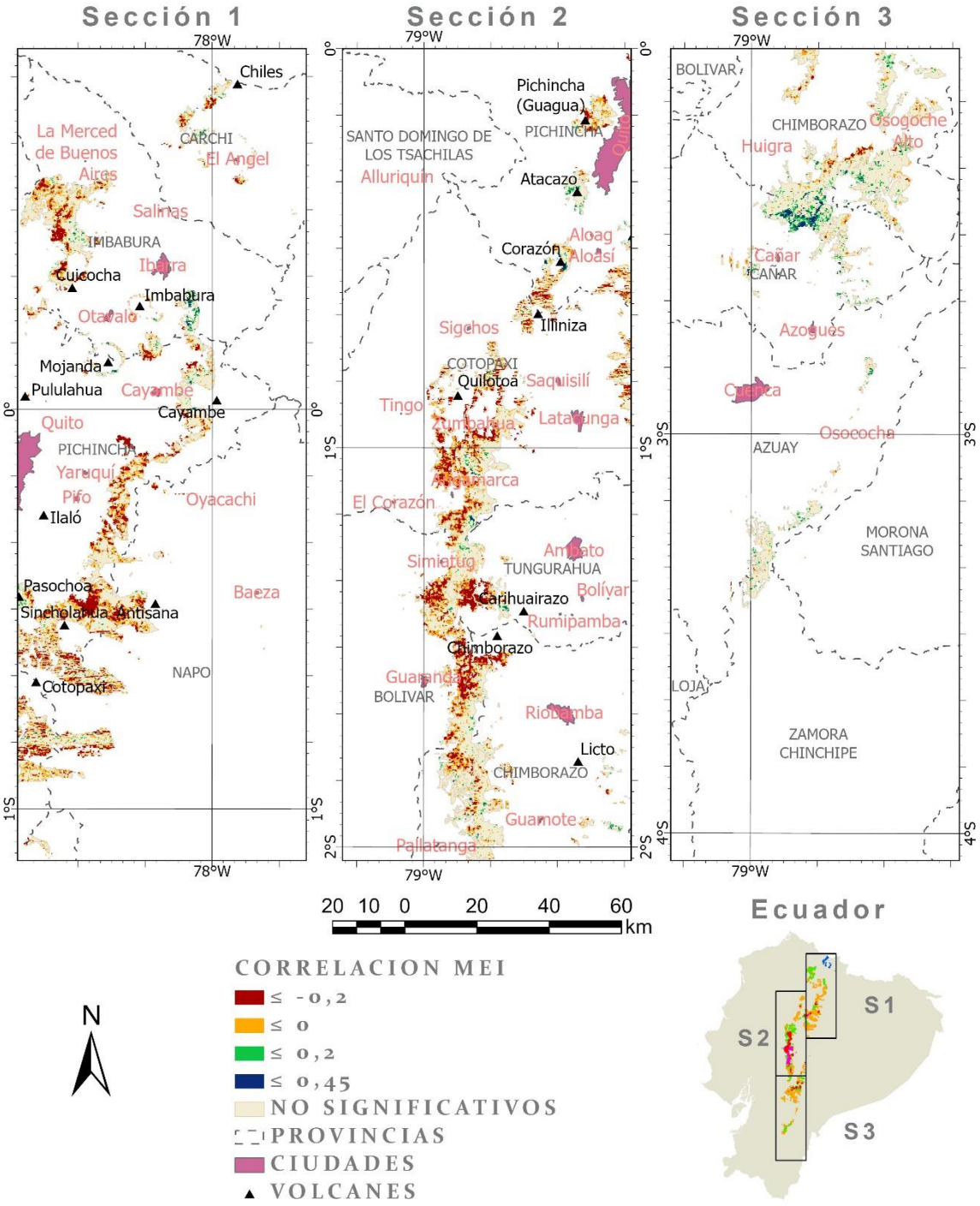


Figura 5.19. Coeficiente de correlación entre NDVI y MEI representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.20 se observa que el 21.7% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 17% muestran una correlación débil directamente proporcional ($0.13 < r < 0.48$) entre el índice Niño1+2 y NDVI, ubicados tanto en la cordillera oriental como occidental. Contrariamente, un 4.7% de los pixeles registran una correlación débil inversamente proporcional ($-0.13 < r < -0.38$) los cuales se ubican principalmente en el páramo de la provincia de Imbabura (Sección 1, figura 5.20), en el Atacazo y Guagua Pichincha (Sección 2, figura 5.20) y en el páramo cerca de Osogoche Alto al sur de la provincia de Chimborazo (Sección 3, figura 5.20).

Se observa mayormente un rango positivo. Esto nos indicaría que un aumento en la temperatura superficial del mar en las costas orientales ecuatoriales influye de manera directamente proporcional en el vigor de la vegetación en el páramo, con excepción de las zonas con correlación negativa en donde esta influencia es contraria. Esto se puede evidenciar en el trabajo realizado por Montalván (2018), en el que relaciona la precipitación con índices del ENOS, como el Niño 1+2, para la parte sur de la región andina ecuatoriana, en donde obtuvo como resultado una correlación positiva débil ($r < 0.3$) entre estas dos variables. Además, en el estudio ejecutado por Ávila (2019) en el que correlaciona a El Niño1+2 y la precipitación, también se observó una correlación positiva con valores moderados ($0.3 < r < 0.6$), para el norte y sur de la Sierra y Amazonía, mientras que para la zona centro y sur de la Costa se obtuvo valores de correlación mayores a 0.6.

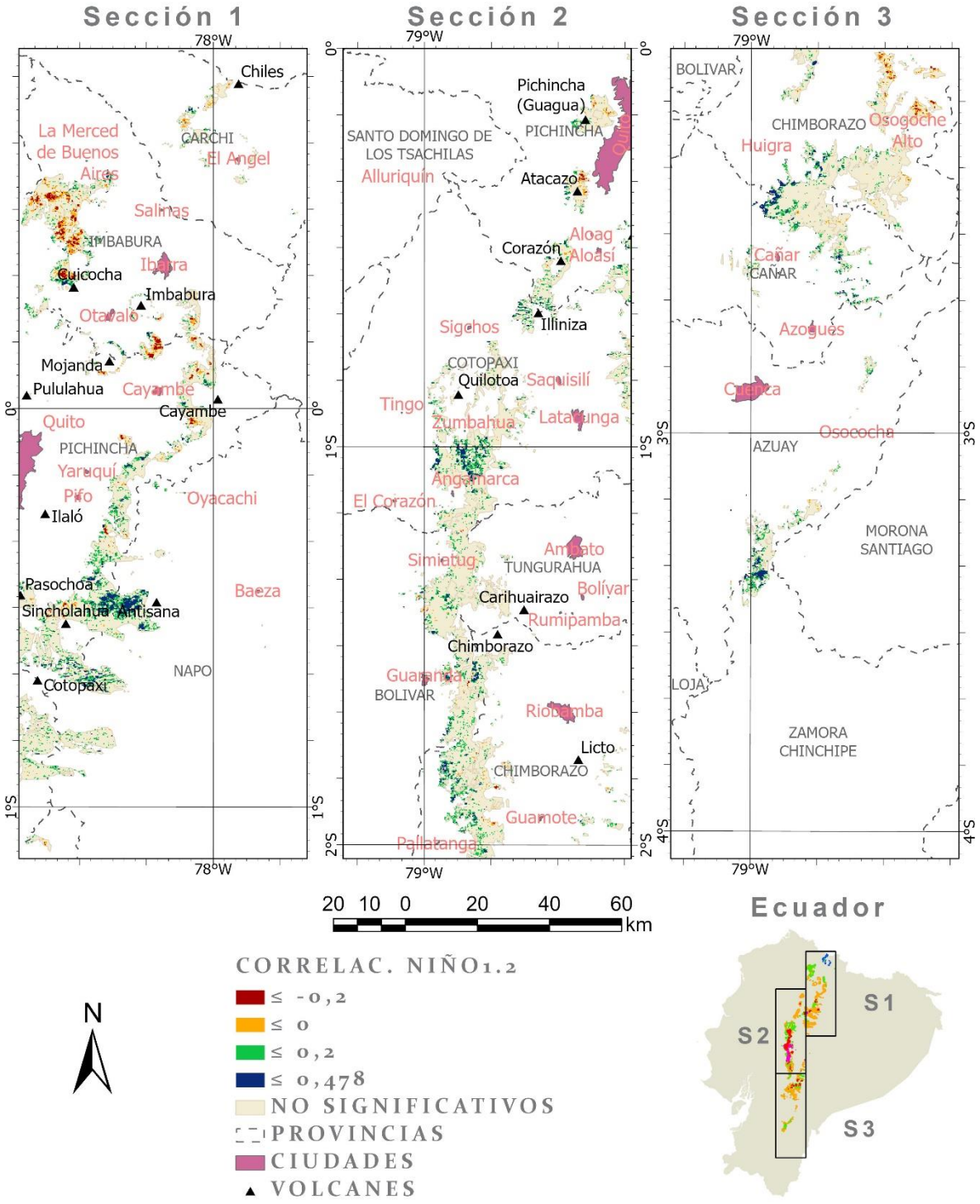


Figura 5.20. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño1+2 representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.21 se observa que el 19.8% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 15.7% muestran una correlación débil directamente proporcional ($0.13 < r < 0.40$) entre el índice Niño3 y NDVI, ubicados tanto en la cordillera oriental como occidental. Mientras que un 4.1% de los pixeles registran una correlación débil inversamente proporcional ($-0.13 < r < -0.38$) los cuales se ubican principalmente en el páramo de las provincias de Imbabura y Pichincha (Sección 1, figura 5.21).

Estos valores muestran que, un aumento en la temperatura superficial del Pacífico oriental influye positivamente en el vigor de la mayor parte de la vegetación del páramo. Se observa, además, que esta correlación es similar a la obtenida con El Niño1+2, sin embargo con una cantidad menor de pixeles significativos, por lo que, al mostrar información similar entre los dos índices se podría hacer uso de solo uno, El Niño1+2, para el estudio de su comportamiento en los Andes. Además, Ávila (2019) señala que El Niño3 no posee una influencia significativa en la zona andina, sino en la región costa y amazónica por lo cual no se consideraría como un buen predictor.

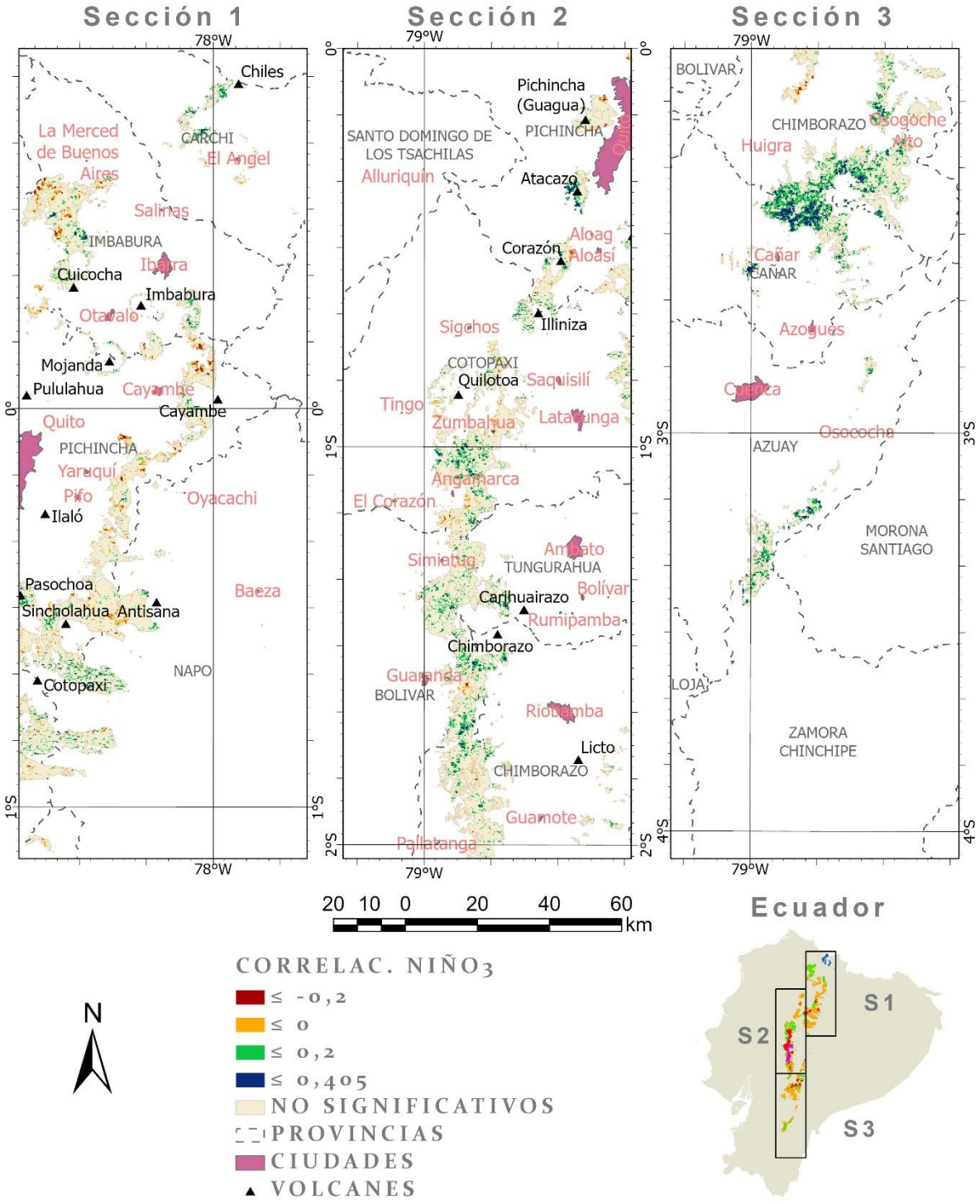


Figura 5.21. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño3 representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.22 se observa que el 25.8% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 16.9% muestran una correlación débil inversamente proporcional ($-0.13 < r < -0.48$) entre el índice Niño4 y NDVI, ubicados tanto en la cordillera oriental como occidental. Contrariamente, un 8.9% de los pixeles registran una correlación débil directamente proporcional ($0.13 < r < 0.40$) los cuales se ubican principalmente en el páramo de la provincia de Carchi e Imbabura (Sección 1, figura 5.20), en el volcán Atacazo (Sección 2, figura 5.22) y en el páramo entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3, figura 5.22).

Los valores de correlación negativa nos muestran que un aumento en la temperatura superficial del Pacífico occidental, influye inversamente en el vigor de la vegetación de la mayor parte del páramo. Esto es evidente en el trabajo realizado por Montalván (2018) en la región sur de la parte andina ecuatoriana, en el que relaciona la precipitación con el índice Niño4, obteniendo como resultado una correlación negativa débil ($r < -0.3$). Además, en el estudio ejecutado por Ávila (2019) en el que correlaciona a El Niño4 y la precipitación, también se observó una correlación negativa con valores moderados ($-0.3 < r < -0.6$), para el norte y sur de la Sierra y para la zona centro y sur de la Costa.

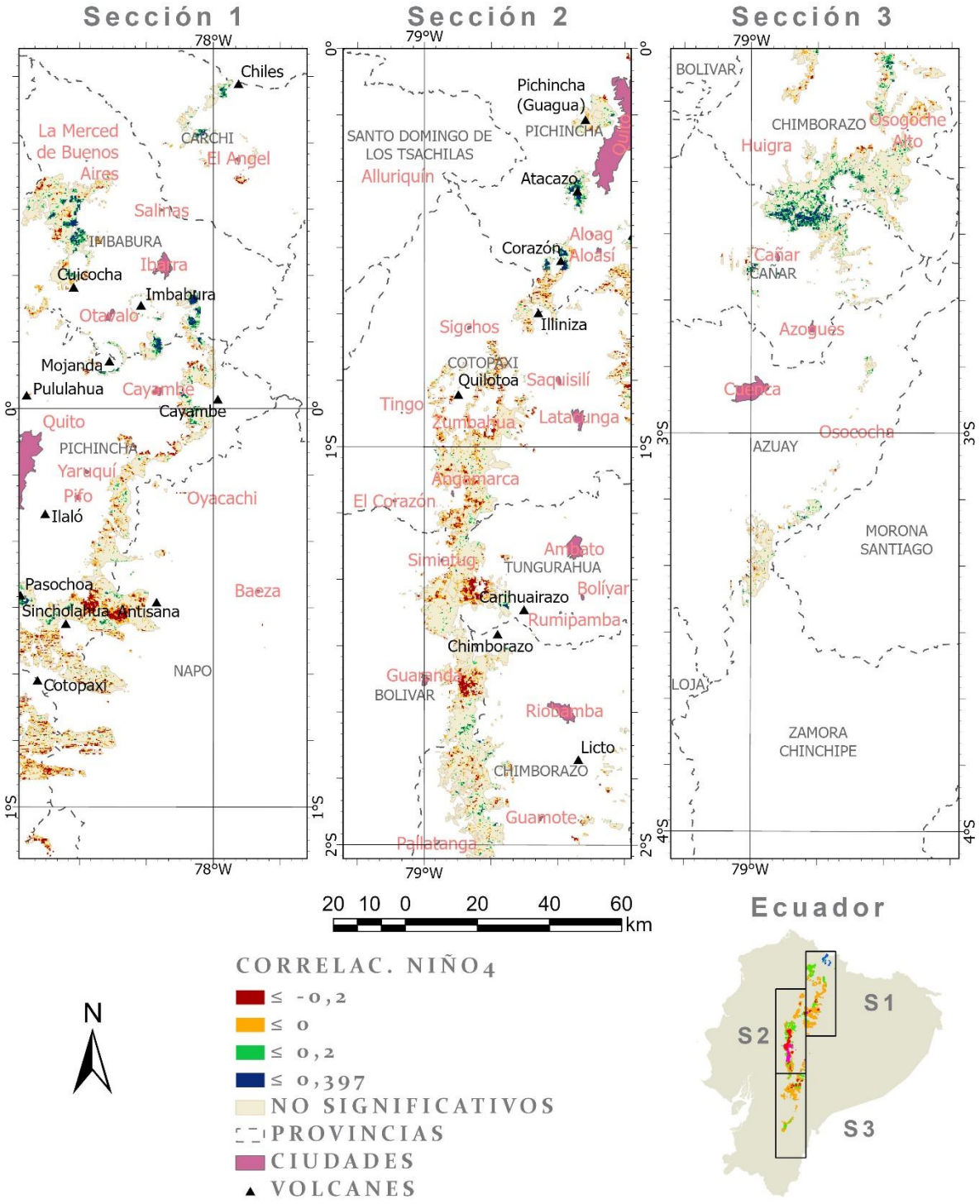


Figura 5.22. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño 4 representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.23 se observa que el 19.6% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 10.1% muestran una correlación débil e inversamente proporcional ($-0.13 < r < -0.37$) entre el índice Niño3.4 y NDVI, ubicados tanto en la cordillera oriental como occidental. Mientras que un 9.5% de los pixeles registran una correlación débil directamente proporcional ($0.13 < r < 0.41$) los cuales se ubican principalmente en el páramo de la provincia de Carchi e Imbabura (Sección 1, figura 5.23), en el Atacazo (Sección 2, figura 5.23) y en el páramo entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3, figura 5.23).

Estos valores reflejan que, un aumento en la temperatura superficial del Pacífico central puede influir tanto positiva como negativamente en el vigor de la vegetación del páramo. Se observa, además, que la correlación entre El Niño3.4 y NDVI son relativamente similares a las obtenidas con El Niño4, sin embargo posee una cantidad menor de pixeles significativos, por lo que se podría hacer uso de solo uno, El Niño4, para el estudio de su comportamiento en los Andes. Ávila (2019) señala que El Niño3.4 no posee una influencia significativa en la región andina y costera, sino en la amazonia y positivamente ($0.3 < r < 0.6$), por lo que no sería de gran utilidad para nuestra área de estudio.

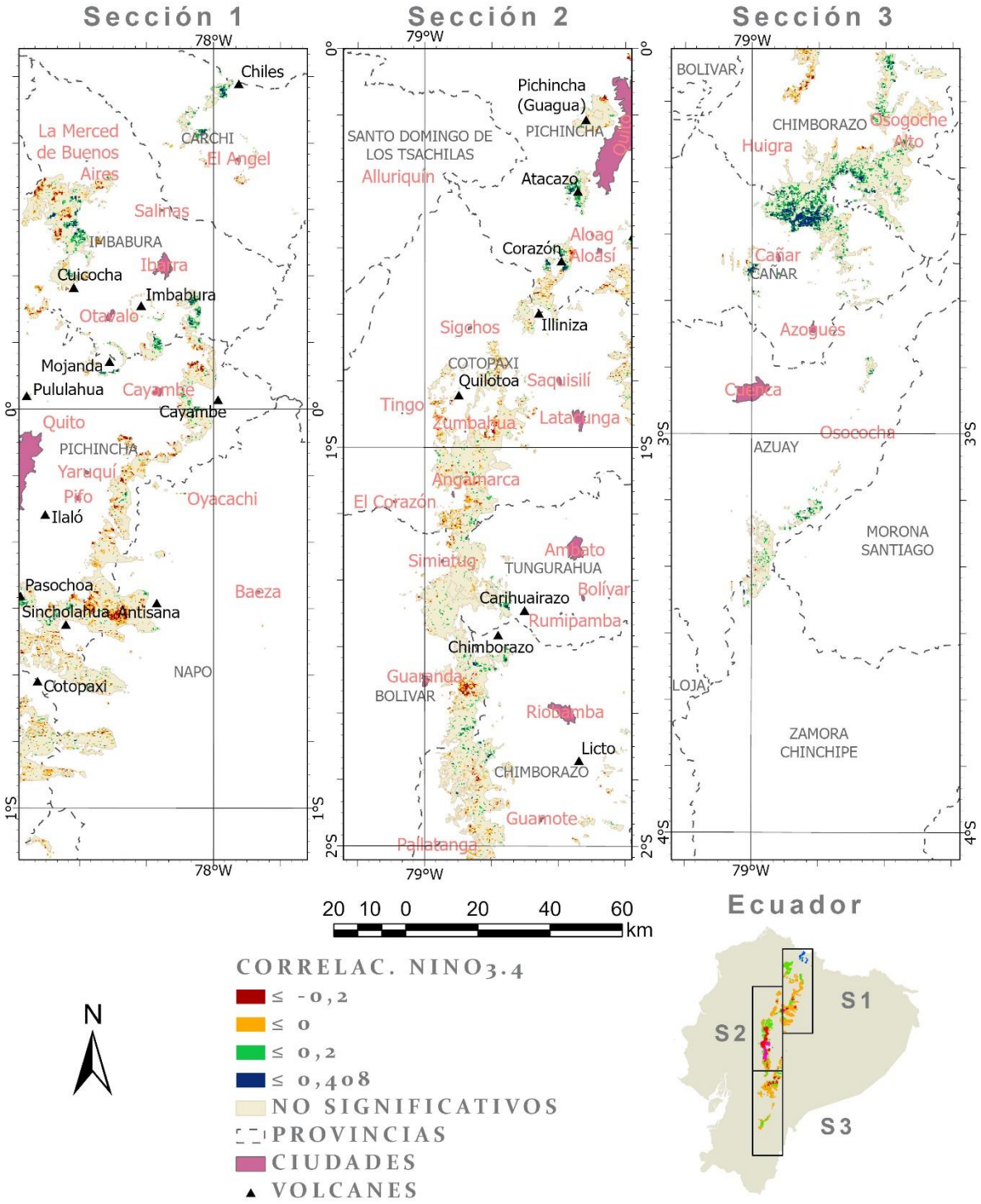


Figura 5.23. Coeficiente de correlación entre NDVI y Niño 3.4 representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En la figura 5.24 se observa que el 16.7% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p<0.05$) de los cuales el 10.7% muestran una correlación positiva débil ($0.12 < r < 0.34$) entre el índice MJO y NDVI, para los páramos ubicados al norte y centro del país, tanto en la cordillera oriental como occidental (Sección 1 y 2 figura 5.24). Mientras que el 6% de los pixeles del páramo poseen una correlación negativa débil ($-0.14 < r < -0.33$), principalmente ubicados en la zona del Atacazo y Guagua Pichincha (Sección 2, figura 5.24) y en el páramo entre las provincias de Chimborazo y Cañar (Sección 3 figura 5.24).

A escala global, un estudio elaborado por Donald et al., (2006), demuestra que el MJO es un fenómeno significativo que puede influir en los patrones de lluvia diarios de los trópicos, incluso en las latitudes más altas, gracias a las teleconexiones existentes con patrones de presión media del nivel del mar a gran escala. Esto generaría un aumento en el verdor de la vegetación en presencia de este fenómeno, debido a las precipitaciones, con lo cual tendría sentido una correlación positiva como la que se obtuvo en un porcentaje de los pixeles.

Dentro de la influencia del MJO a escala regional se tiene el estudio ejecutado por Álvarez et al., (2016) el cual analiza la variabilidad de la precipitación y temperatura en Sudamérica explicada por el MJO. La influencia de este índice se detectó en todas las estaciones (diciembre-febrero, marzo-mayo, junio-agosto, septiembre-octubre), pero con grandes variaciones en las mismas, además de efectos opuestos tanto para la parte oriental como occidental del país, es decir, una disminución de la precipitación/temperatura en la costa del Ecuador y un aumento de las mismos en la Amazonía y viceversa. Este comportamiento explicaría los valores de correlación obtenidos, ya que no se tiene una dirección de correlación preponderante o definida. Sin embargo, la cantidad de pixeles significativos para esta correlación es muy baja, además de su correlación débil, por lo que no se podría concluir algo contundente.

Pabón & Dorado (2008) examinaron la variación de la precipitación de la región tropical entre estaciones, con lo cual identificaron señales con periodos entre 20-25, 30, 40 y 50 días, para la región del Caribe y algunos lugares de los Andes, mientras que el coeficiente de correlación encontrado, entre estas dos variables, fue muy bajo debido a la presencia de señales diferentes a las 30-60 días. Además,

en un estudio desarrollado en las costas de Ecuador para la predicción de la precipitación utilizando al MJO y el Niño 3 (Trickey, et al., 2010), no se obtuvieron resultados muy favorables debido a la utilización de datos mensuales para tratar de incluir procesos de 20-60 días, además de la diferencia en la escala entre el ENOS (interanual) y el MJO (intraestacional). Esto refleja la importancia de poder detectar estas señales o periodos entre temporadas en nuestro territorio para la obtención de una mejor correlación con una mayor significancia.

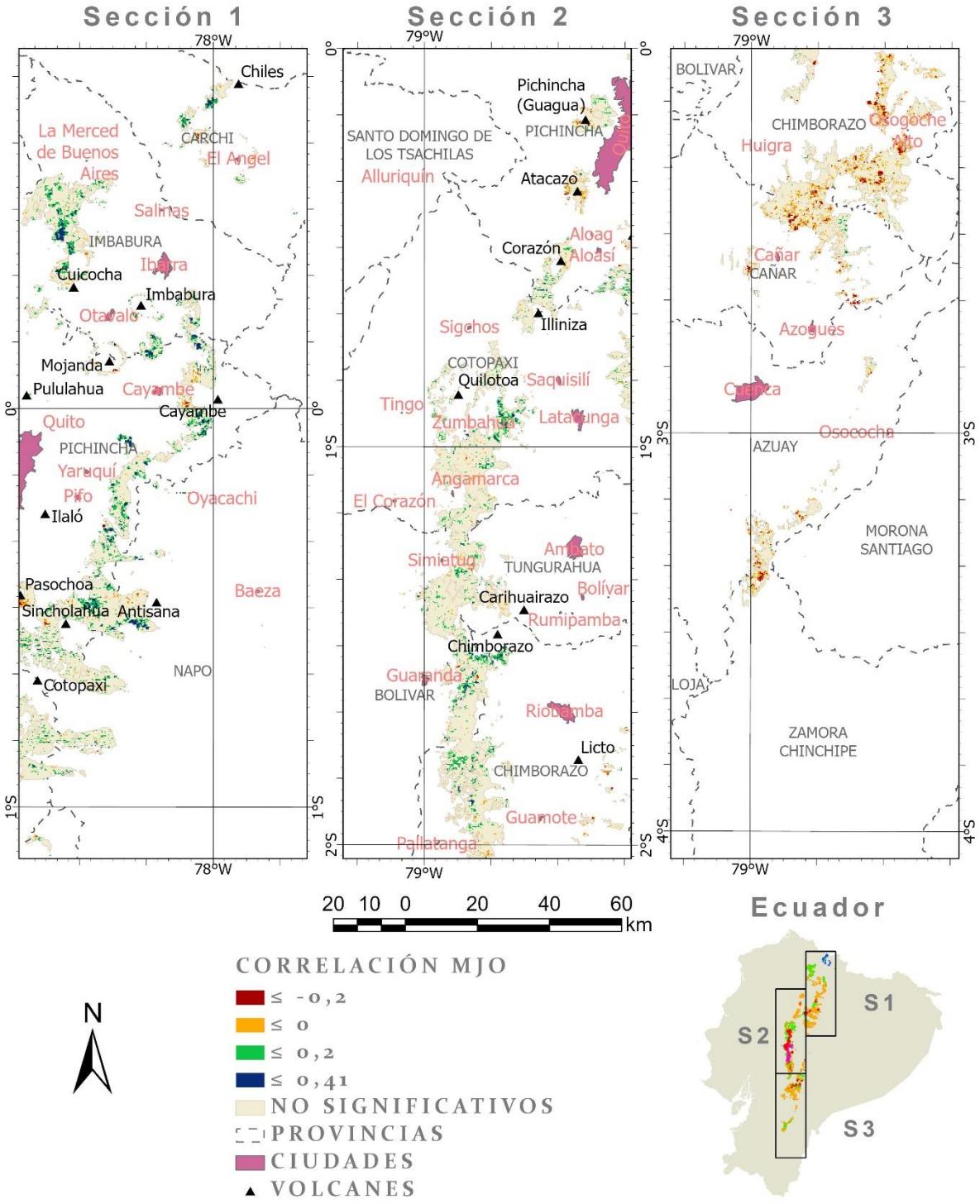


Figura 5.24. Coeficiente de correlación entre NDVI y MJO representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

Se observa que el 36.7% de los pixeles analizados son estadísticamente significativos ($p < 0.05$) de los cuales el 35.8% muestran una correlación débil directamente proporcional ($0.13 < r < 0.38$) entre el índice NAO y NDVI, presentes tanto en la cordillera oriental como occidental. Mientras que tan solo un 0.9% de los pixeles presentan una correlación débil inversamente proporcional ($-0.14 < r < -0.24$) ubicados en los páramos entre el volcán Antisana y Sincholahua (Sección 1, figura 5.25). Estos resultados tendrían relación con los obtenidos en el estudio a nivel global de Potter et al. (2008), el cual refleja la existencia de una correlación débil ($r < 0.5$) entre el NAO y la vegetación del Ecuador. Además, se comparó los resultados con el estudio de Ávila (2019) en el cual se correlaciona este índice con la Precipitación en Ecuador, obteniendo una correlación positiva con valores bajos menores a 0.5 en la mayor parte de la Sierra Ecuatoriana.

Sin embargo, contradice con los resultados obtenidos por Li et al. (2012), (estudio a nivel global) el cual registra una correlación negativa entre -0.4 y -0.8. Además, determina un retraso de hasta más de un año del NAO, y añade que aunque el NAO esté probablemente vinculado con el crecimiento de la vegetación en la zona ecuatorial y el hemisferio sur en la temporada de verano (mayo, junio, julio y septiembre), este retraso podría afectar el crecimiento de la vegetación en la segunda temporada de crecimiento. Sin embargo, menciona que estas anomalías son difíciles de explicar directamente, por lo que se debería ejecutar estudios que incluyan una memoria del sistema climático que puede residir en algunos forzamientos a gran escala como la memoria oceánica, el ciclo del carbono u otros ciclos bioquímicos, que pueden proporcionar la explicación potencial para ello.

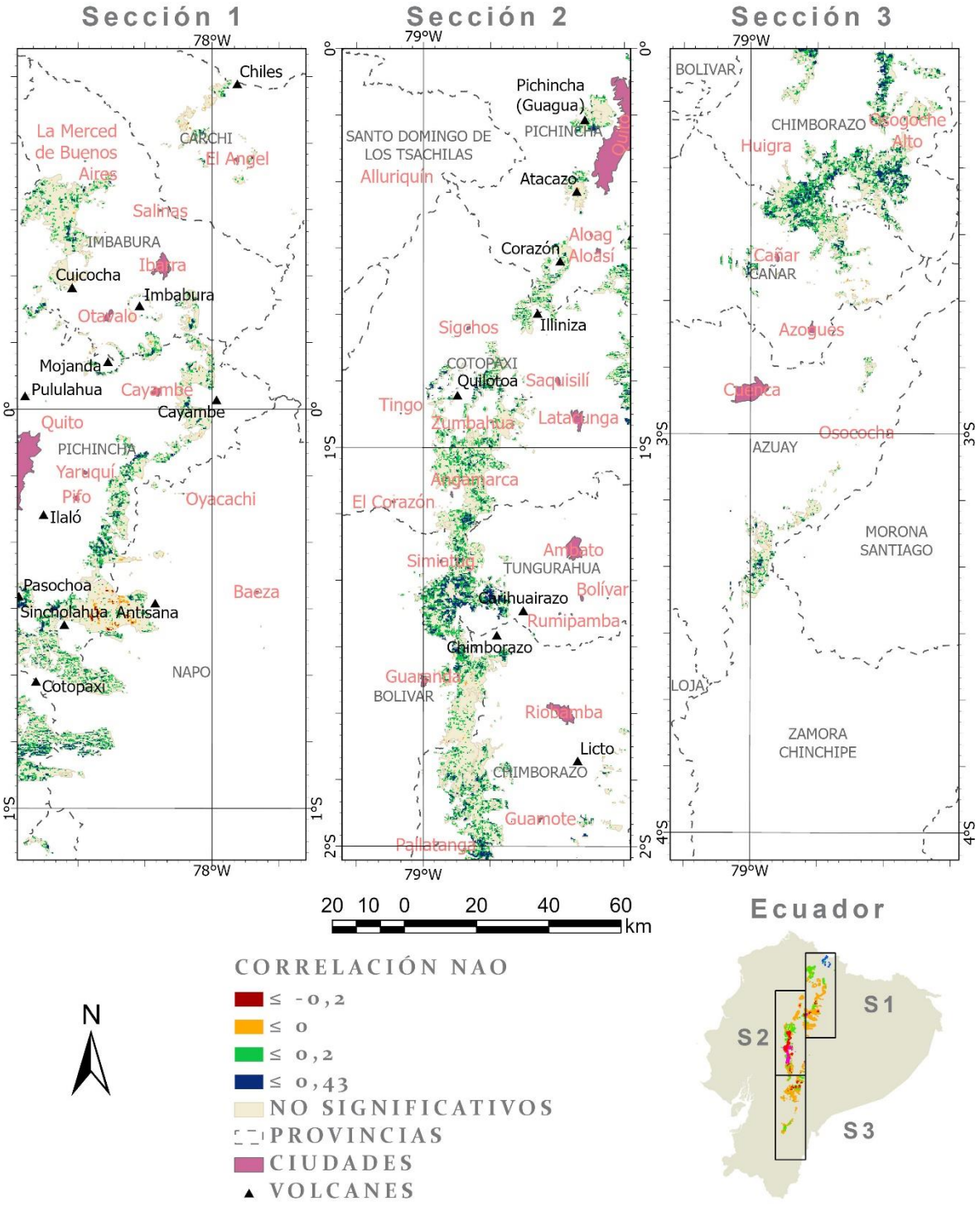


Figura 5.25. Coeficiente de correlación entre NDVI y NAO representado espacialmente.

Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

En conclusión, podemos decir que no se registra ninguna correlación realmente fuerte entre los PCG y NDVI enfocándole a todo el periodo de estudio. Esto puede ser debido al diferente tiempo de ocurrencia de cada uno de ellos, siendo unos interdecadales como el PDO, interanuales como el MEI e interestacionales como el MJO. Además, si bien algunos no influyen directamente en la vegetación del páramo ecuatorial, como en el caso del AAO, estos pueden influir en procesos atmosféricos en los eventos del ENOS, debido a las teleconexiones que existen entre ellos, mostrando que el clima es un sistema interconectado.

Dentro de los fenómenos climáticos analizados, el PDO y el ENOS son los que guardan mayor relación entre sí, siendo así que las teleconexiones de ENOS con las precipitaciones sudamericanas son considerablemente fuertes (débiles) cuando ENOS y PDO se encuentran en fases similares (opuestas), es decir, crean un fondo en la que estas teleconexiones actúan constructivamente (destructivamente), por lo que el enfoque tradicional basado en ENOS de la vigilancia del clima mejoraría si se añadieran la información sobre las fases del PDO (Kayano y Andreoli, 2007). Además, se evidenció la variación de la fuerza y dirección de las correlaciones en diferentes zonas del páramo, especialmente en el páramo entre las provincias de Chimborazo y Cañar, lo que nos muestra la variabilidad de la vegetación tanto entre latitudes como cordilleras.

En la figura 5.26 se observa un diagrama de caja que representa la distribución de los valores de correlación de cada año del periodo de estudio. Es decir, se correlacionó los valores de enero a diciembre de NDVI del año 2001 con los valores de enero a diciembre de cada índice para el mismo año. Se registra correlaciones tanto positivas como negativas a lo largo del tiempo para todos los índices en estudio, es decir, que para un mismo ecosistema existen comportamientos o efectos diferentes de estos patrones climáticos. Para el MEI (figura 5.26) se evidencia una correlación negativa en la mayor parte de los años de estudio. Para los años 2007, 2008, 2010 y 2014 se manifiesta una correlación positiva o no definida, sin embargo, el porcentaje de pixeles significativos es bajo (10%-18%) por lo que no se podría obtener algo concluyente de esos años. No obstante, para los años 2016 y 2017, años con presencia del Niño, también se

observa una correlación positiva con porcentaje de pixeles moderados (43%-45%), esto puede ser debido a la intensidad del evento, ya que fue catalogado como uno de carácter muy fuerte, pudiendo generar lluvias no solo en la región costa sino también en la serranía. Con respecto al PDO (Anexos 2), se registra un mayor número de años con una correlación positiva, mientras que otros años muestran un cambio de dirección o dirección no definida, sin embargo poseen un porcentaje de pixeles significativos bajo.

Con respecto a las correlaciones de los índices restantes se registran una oscilación en la dirección de las correlaciones, año tras año, por lo cual se debería considerar los periodos de mayor influencia de cada índice para la obtención de mejores resultados. Para el caso de AAO, se observa que posee una mayor influencia en el trimestre diciembre-febrero (Garreaud et al., 2009). Un estudio realizado por Álvarez et al., (2016) detectó la influencia del MJO en todas las estaciones, señalando una leve disminución de la temperatura, en la zona occidental del país, de hasta -0.2°C en el trimestre diciembre-febrero que se intensifica hasta llegar a julio-agosto con una disminución de -0.5°C, sucediendo lo contrario en la Amazonía. Mientras que la probabilidad de la precipitación aumenta en estos meses para la región Andina, por lo que se debería tener estas consideraciones. Mientras que para los índices de ENOS, los resultados obtenidos por Poveda et al., (2002) señalan una mayor correlación entre los índices y caudales de Colombia durante los meses de diciembre a febrero. Sin embargo, varios estudios en los glaciares andinos (Cadier et al. 2007; Vuille et al. 2000) demuestran que la oscilación ENOS genera un retraso en los cambios de los patrones de precipitación y temperatura de estas zonas, afectando a la ablación de los glaciares después de 3 a 4 meses de su aparición, por lo que se debería considerar todo este lapso de influencia en el análisis.

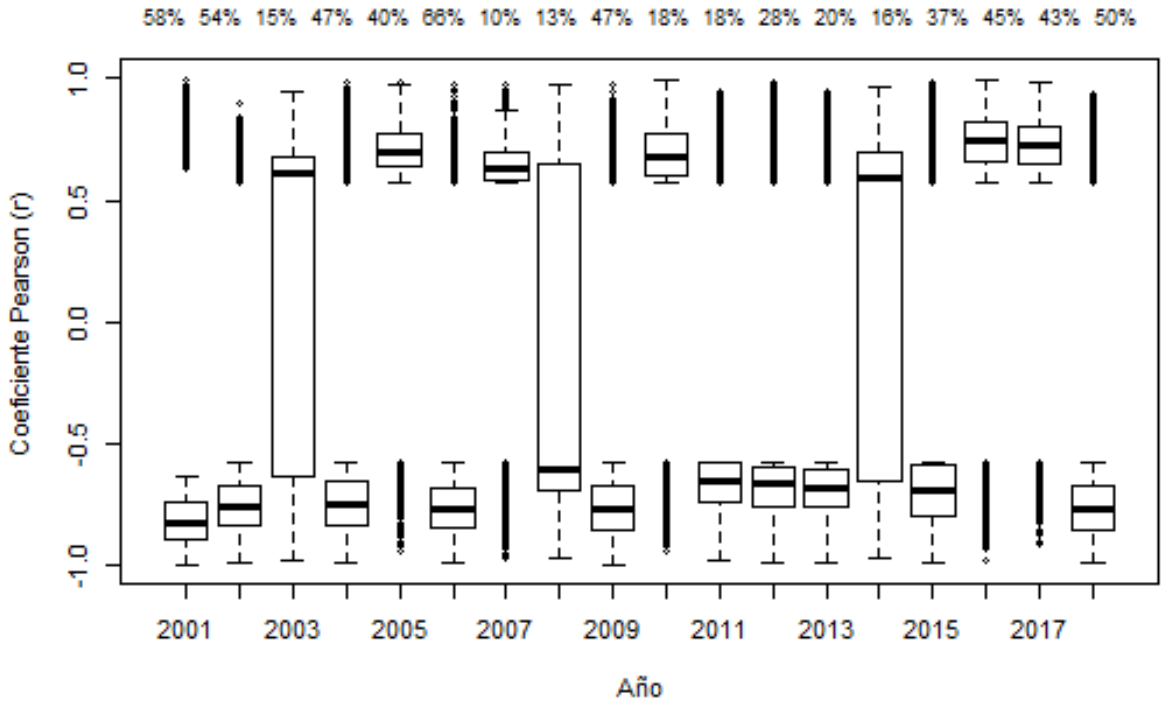


Figura 5.26. Diagrama de cajas de las correlaciones anuales entre MEI y NDVI. Los valores de la parte superior indican el porcentaje de pixeles con correlaciones estadísticamente significativas para cada año de estudio. Los años 2007, 2010 y 2016 corresponden a los años con presencia del fenómeno de El Niño, mientras que 2008, 2011, 2012 y 2018 corresponden a años con presencia de La Niña. Las figuras restantes se encuentran en los Anexos 2. Elaborado por: Uvidia Karla, 2020

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La conclusión alcanzada de acuerdo al primer objetivo propuesto en esta investigación fue la siguiente:

- Por medio del análisis y procesamiento de imágenes satelitales MODIS se pudo obtener información importante con respecto al comportamiento de la vegetación, a través de la implementación de una base de datos de NDVI que permite la cuantificación y monitoreo del páramo a lo largo de los 18 años del periodo de estudio. Se estima que esta metodología sea de beneficio en el manejo adecuado de este importante recurso natural permitiendo su conservación.

Las conclusiones alcanzadas de acuerdo al segundo objetivo abordado en esta investigación fueron las siguientes:

- La actividad fotosintética en los ecosistemas evaluados es muy variable a lo largo del año, identificándose un incremento de NDVI entre los meses de octubre y mayo y un decrecimiento entre junio y septiembre. Este comportamiento de la vegetación responde a los periodos estacionales de la precipitación (temporada lluviosa y seca), reflejándose los efectos de las lluvias un mes después de las mismas. Con respecto al ecosistema herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (HsSn03), este presentó los valores más bajos de NDVI en comparación con los otros ecosistemas, dado la alta variabilidad de la precipitación y la poca resiliencia de su vegetación, lo que lo hace un ecosistema frágil ante el cambio climático. Mientras que el herbazal y arbustal siempreverde subnival del páramo (HsNn03) mostró una buena capacidad de retención de agua del suelo y resistencia de la vegetación frente a su limitada cantidad de lluvia.
- Con el análisis de la serie temporal de NDVI, se observaron anomalías positivas en los años con eventos de La Niña y un menor registro de anomalías negativas a partir de 2008 (enfriamiento del océano Pacifico por

un PDO negativo) a causa del incremento de las lluvias que traen estos fenómenos a los Andes, lo cual evidencia la influencia de los PCG en el clima de la región y la vegetación. La dinámica interanual de NDVI mostró un ligero incremento de sus valores en los años que se desarrolló un evento de La Niña, así como a lo largo del periodo de estudio, reflejando una tendencia positiva en el tiempo que se comprobó a través del test de Mann Kendall, lo cual estaría relacionado con el aumento de la precipitación y la disponibilidad de agua en estos años. A su vez, las variaciones contrastantes entre curvas mostraron la diferente respuesta de la vegetación de cada ecosistema a cambios ambientales.

- El análisis temporal, además, mostró que los mayores valores de coeficiente de variación intra-anuales se producen en la temporada seca, entre agosto y septiembre (9-14%), mientras que el CV más bajo se produce en la temporada lluviosa entre los meses de abril y mayo (12-21%), presentándose una mayor variabilidad en años con eventos del Niño y una menor en años con presencia de La Niña, lo cual refleja su relación con la vegetación del páramo y la importancia de la disponibilidad de agua en la misma. Una variación brusca en la vegetación puede disminuir su productividad.

Las conclusiones obtenidas de acuerdo al tercer objetivo planteado en esta investigación fueron las siguientes:

- El análisis espacial de la vigorosidad de la vegetación del páramo muestra una variabilidad en toda su extensión, generada por la heterogeneidad en la distribución de las lluvias ocasionadas principalmente por las corrientes marinas, dirección y velocidad del viento y la topografía del terreno. Además de la cantidad de lluvia, la precipitación horizontal es fundamental para la vegetación, como un medio más de captación de agua. El tipo de suelo es importante para su captación, además de los mecanismos de adaptación de la vegetación.
- Con respecto al CV analizado espacialmente, se registró una mayor variabilidad en el flanco izquierdo de la cordillera occidental, especialmente en el Herbazal húmedo montano alto superior (HsSn03) debido al poco

poder de retención de agua y a la fragilidad de su ecosistema, descrita anteriormente. Por lo cual se concluye que la disponibilidad de agua incide inversamente en la variabilidad de la vegetación.

La conclusión recabada de acuerdo al cuarto objetivo expuesto en esta investigación fue la siguiente:

- El análisis espacio-temporal reflejó lo complejo de la variabilidad de NDVI ya que a pesar de encontrarse los puntos de interés en la misma cordillera o en la misma latitud/longitud, cada zona posee un comportamiento particular. Se observa además, que si bien a nivel general, en la región interandina, la tendencia descrita del comportamiento del ENOS es un incremento de la vigorosidad en presencia de La Niña y una disminución en presencia del Niño, en algunos puntos como en Pallatanga o Sangay, su comportamiento resulta opuesto, posiblemente debido a que son ecosistemas más expuestos al encontrarse a una menor altitud, por lo tanto se evidencia que para un mismo ecosistema la influencia climática puede ser variada.

Las conclusiones alcanzadas de acuerdo al quinto objetivo planteado en esta investigación fueron las siguientes:

- No se registró ninguna correlación significativamente fuerte entre los PCG y NDVI ($r < 0.5$), sin embargo, se evidenció la influencia de estos en la variabilidad temporal y espacial de la vegetación, especialmente para índices como el MEI y PDO. Para el MEI se observó un rápido reverdecimiento de la vegetación en los eventos de La Niña, seguido de una disminución de la vigorosidad en los años con eventos de El Niño, afectando principalmente a las tendencias de vegetación a corto plazo. Con respecto al PDO se registró una relación entre este índice y el ENOS, evidenciando una intensificación de los eventos de El Niño (La Niña) durante una fase positiva (negativa) del PDO, mientras que una fase negativa (positiva) lo debilita, afectando a las tendencias a largo plazo en el crecimiento de la vegetación. Además, si bien algunos, como el AAO, no registraron una influencia en la vegetación, se encontró que estos pueden contribuir en procesos atmosféricos en los eventos del ENOS, por las teleconexiones que

existen entre ellos, o que pueden influir en las precipitaciones del hemisferio sur, como el MJO, mostrando que el clima es un sistema interconectado. Sin embargo se debe considerar la diferencia en el tiempo de su ocurrencia (interdecadales, interanuales o interestacionales). Adicionalmente, si bien en bibliografía consultada se menciona que se refleja un mejor resultado con el uso de índices del ENOS como El Niño1+2 o Niño4, para nuestro caso de estudio, se obtuvo mejores resultados de correlación con el índice MEI.

6.2 RECOMENDACIONES

A causa de los problemas con la nubosidad en el páramo, no se pudo analizar la influencia del clima en las laderas interandinas y en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes, por lo cual se debería profundizar estudios en estas zonas. Una de las formas para evitar este inconveniente sería la selección de imágenes satelitales de años en donde se registre la menor nubosidad para conseguir datos de mayor exactitud o a través del uso de satélites que permitan obtener imágenes independientemente de las condiciones climáticas, como por ejemplo el satélite Radar de Apertura Sintética (SAR).

Es importante el uso de registros más largos para examinar la tendencia de la vegetación a lo largo de las últimas décadas, así como para confirmar la fuerza de relación con los patrones climáticos globales, teniendo de este modo una visión más amplia del comportamiento y relación entre ellos, además de resultados más sólidos.

Incentivar el estudio de los PCG, las causas de su variabilidad, las teleconexiones entre ellos, así como el impacto de otras oscilaciones macroclimáticas regionales en la precipitación y vegetación del país. Esto puede contribuir en los estudios de los recursos hídricos y la conservación de la vegetación y los glaciares mediante predicciones o modelaciones de mediano y largo plazo a través del uso de sensores remotos y otras herramientas como inteligencia artificial para el procesamiento de toda esta información; considerando siempre la diferencia en el tiempo de ocurrencia de cada uno de los índices, siendo unos interdecadales como el PDO, interanuales como el MEI e interestacionales como el MJO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adhikary, S. K., Yilmaz, A. G., & Muttil, N. (2015). Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. Hydrological Processes, 29(11), 2582-2599. https://doi.org/10.1002/hyp.10389

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (2017). Multivariate ENSO Index (MEI). Recuperado de https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/

Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. Pirineos, 165(0), 7–27. https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001

Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. Ecosistemas 17(3):108-117.

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M., & Delibes, M. (2008) Trends in the surface vegetation dynamics of the National Parks of Spain as observed by satellite sensors. Applied Vegetation Science, 11(4), 431-440

Alcaraz Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., & Trishchenko, A. (2010). Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets.Global Change Biology, 16(2), 760-770

Aldás Andrade, A. P. (2019). Análisis de la dinámica temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los años 1986, 2001 y 2017 en la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas, Imbabura, mediante el uso de google Earth Engine (Bachelor's thesis, PUCE-Quito).

Almeida, A. F. (2015). Procesamiento digital de imágenes multiespectrales Ladsat 8, para aplicaciones agronómicas en la subcuenca del río Guayllabamba. Quito: Tesis de pregrado Ingeniera Agrónoma.

Álvarez, M.S., Vera, C.S., Kiladis, G.N., Liebmann, B. (2016). Influence of the

Madden-Julian Oscillation on precipitation and surface air temperature in South America. Climate Dynamic, 46 (1). doi: 10.07/s00382-015-2581-6

Araya Morales, E. J. (2009). Manual de procesos en fotografías aéreas e Imágenes de satélite. San José - Costa Rica.

Ávila Andrade, P. R. (2019). Exploración de redes bayesianas para detectar relaciones entre la precipitación del Ecuador y teleconexiones climáticas (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

Basantes, R., Rabatel, A., Alvarez, D., Francou, B., Galarraga, R., Maisincho, L., & Caceres, B. (2014). Mass balance evolution on two glaciers in the ecuadorian Andes (0° 28'S) since the mid-20th century. EGUGA, 6250.

Barbosa, H. A., Huete, A. R., & Baethgen, W. E. (2006). A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. Journal of arid environments, 67(2), 288-307.

Barros, J. G., Troncoso, A. Y. 2010. Atlas climatológico del Ecuador. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Beltrán , K., Salgado, S., Cuesta, F., León Yánez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Velasteguí , A. (2009). Distribución Espacial,Sistemas Ecológicos y Caracterización Florística de los Páramos en el Ecuador. Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA. 149p.

Bendix, J., Trachte, K., Palacios, E., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., Nauss, T., & Bendix, A. (2011). EL NIÑO MEETS LA NIÑA—ANOMALOUS RAINFALL PATTERNS IN THE" TRADITIONAL" EL NIÑO REGION OF SOUTHERN ECUADOR. Erdkunde, 151-167.

Bravo, N. (2017). Teledetección Espacial Landsat, Sentinel-2, ASTER L1T y MODIS. Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. Cuenca. Recuperado: http://www. paramo. org/files/hidrologia_paramo. pdf.

Buytaert, W., y Ramírez, J. (2012). Generación de escenarios desagregados del cambio climático para los Andes Tropicales. En Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra, M.T., Postigo, J., Peralvo, J. (Eds.), Panorama andino sobre cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en Andes Tropicales. (pp. 37-57). Lima: CONDESAN, SGCAN.

Cadier E, Villacis M, Garces A, Lhuissier P, Maishincho L, Laval R, Paredes D, Caceres B, Francou B (2007) Variations of a low latitude Andean glacier according to global and local climate variations: first results. Glacier Hydrology, IAHS Publ. 318, pp 1–9

Camacho, M. (2013). Los páramos ecuatorianos: caracterización y Consideraciones para su conservación y Aprovechamiento sostenible. Universidad Central del Ecuador

Campozano, L., Robaina, L., & Samaniego, E. (2020). The Pacific Decadal Oscillation modulates the relation of ENSO with the rainfall variability in coast of Ecuador. International Journal of Climatology. doi:10.1002/joc.6525

Carlquist, S. (1994). Anatomy of tropical alpine plants. En: Tropical alpine environments: plant form and function. (P.W. Rundel; A.P. Smith y F.C. Meinzer, eds.) Cambridge: Cambridge University Press. p.111-128. par/bot

Carvalho, L. M. V.; Jones, C. (2009). Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: Cavalcanti, I. F. de A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A. J. da; Dias, M. A. F. da Silva (orgs). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, pp. 96-109.

Chen, W.Y., J. Seiner, T. Suzuki y M. Lackner (2012), Handbook of climate change mitigation, doi 10.1007/978-1-4419-7991-9_17. Springer.

Chuvieco, E. (2008). Teledeteccion ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona, España. Editorial Ariel S.A.

Climate Prediction Center. (2015). Teleconnection Pattern Calculation Procedures. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/method.shtml

Coello, M. (2012). Las corrientes marinas. Recuperado de: https://caumas.org/wp-content/uploads/2015/04/LAS-CORRIENTES-MARINAS.pdf

Conde, C. (2006). México y el cambio climático global. México D.F., Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Pp.28.

Deser, E., Trenberth, K. y National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2016). "The Climate Data Guide: Pacific Decadal Oscillation (PDO). Definition and Indices." Recopilado de: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/pacific-decadal-oscillation-pdo-definition-and-indices.

Donald, A., H. Meinke, B. Power, A. de H.N. Maia, M. C. Wheeler, N. White, R. C. Stone, and J. Ribbe(2006), Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation onrainfall, Geophys. R es. Lett., 33, L0970 4, doi:10.1029/2005GL025155

Duellman, W. E. 1979. The South American herpetofauna: It's origin, evolution, and dispersal. Museum of Natural History. The University of Kansas 7: 1–485. Lawrence, Kansas, USA.

Earth Observing System (2017). NDVI. Recuperado el 29 de febrero de 2020 de: https://eos.com/ndvi/es/

Fogt, R. L., and D. H. Bromwich, 2006: Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high-latitude South Pacific gov-erned by coupling with the southern annular mode.J. Climate,19,979–997

Gao, F., Morisette, J. T., Wolfe, R. E., Ederer, G., Pedelty, J., Masuoka, E., ... & Nightingale, J. (2008). An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI time series. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5(1), 60-64.

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281(3-4), 180-195.

GIS Geography, 2020a. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)?. Recuperado de: https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/

GIS Geography, 2020b. Kriging Interpolation – The Prediction Is Strong in this One. Recuperado de: https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/

Green, E. P., Mumby, P.J., Edwards, A. J., Clark, C. D., (Ed. A. J. Edwards), 2000. Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management. Coastal Management Sourcebooks 3, UNESCO, Paris. x + 316 pp.

Gottschalck, J., & Higgins, W. (2008). Madden Julian oscillation impacts. NOAA Climate Prediction Center.[Available online at http://www. cpc. ncep. noaa. gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_1page_facts heet. pdf.].

Gottschalck, J., Kousky, V., Higgins, W., y L'Heureux M., (2005). Madden Julian Oscillation (MJO). NOAA / NWS / NCEP Climate Prediction Center

Gutiérrez, S., Carvajal, Y., y Ávila, A. (2013). Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua. Entre Ciencia e Ingeniería, (13): 26-33.

Hidalgo-Proaño, M. (2017). Variabilidad Climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. CienciAmérica, 6(2), 42–47.

Hofstede, R. (1997). La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo. EcoPar, Agosto.

Hofstede, R., Coppus, R., Vásconez, P. M., Segarra, P., Wolf, J., & Sevink, J. (2002). El estado de conservación de los páramos de pajonal en el Ecuador. Ecotropicos, 15(1), 3-18.

Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., … Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. Retrieved from www.uicn.org/sur

Huber, S., & Fensholt, R. (2011). Analysis of teleconnections between AVHRR-based sea surface temperature and vegetation productivity in the semi-arid Sahel. Remote Sensing of Environment, 115(12), 3276-3285.

Jiménez, R. 2008.Aspecto biológicos de El Niño en el Océano Pacifico Ecuatorial, pp. 309

Jimenez, Ma del Carmen (2018). Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México. INDICADORES CLIMATICOS. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global

Josse, C., Young, B., Lyons-Smyth, R., Brooks, T., Frances, A., Comer, P., Petry, P., Balslev, H., Bassuner, B., Goettsch, B., Hak, J., Jørgensen, P., Larrea-Alcázar, D., Navarro, G., Saatchi, S., Sanchez de Lozada, A., Svenning, J. C., Tovar, L. A., & Moscoso, A. (2013). Desarrollo de insumos para la toma de decisiones de conservación en la cuenca amazónica occidental. Ecología Aplicada, 12(1), 45-65.

Kayano, M. T., & Andreoli, R. V. (2007). Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 27(4), 531-540.

Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., Takahashi, K., (2015). The JRA-55 Reanalysis: general specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Jpn. 93, 5-48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001

Lau, W., & Waliser, D. (2012). Intraseasonal Variability in the atmosphere-ocean climate system. Chichester. Springer- Praxis Books in Environmental Sciences. Berlin-Heidelberg, 613p.

León-Yánez, S. (2000). La flora de los páramos ecuatorianos. La Biodiversidad de los Páramos. Serie Páramo 7. Quito: Abya Yala.

L'Heureux, M. L., and W. J. Thompson, 2006: Observed relation-ships between the El Nin˜o–Southern Oscillation and the ex-tratropical zonal-mean circulation.J. Climate,19,276–287.

Li, A., Liang, S., Wang, A., & Huang, C. (2012). Investigating the impacts of the North Atlantic Oscillation on global vegetation changes by a remotely sensed vegetation index. International journal of remote sensing, 33(22), 7222-7239.

Llambí, L., Soto, A., Celleri, R., De Biervre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012).

Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino. Quito. 271p.

LP DAAC, (2006). MODIS Reprojection Tool Version 3.3 Available. Recuperado de: https://lpdaac.usgs.gov/news/modis-reprojection-tool-version-33-available/

Luteyn, J.L. (1992). Páramos: why study them? En: Páramo: an andean ecosystem under human influence. (H. Balslev y J.L. Luteyn, eds.) London: Academic Press. p.1-14. andes/par/veg

Lutgens, Frederick K. y Tarbuck, Edward J.(2000). Essentials of Geology, 7th Ed., Prentice Hall.

Maita Chamba, J. A. (2015). Dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

Mantto-Telecom (2017). Espectro electromagnético. Retrieved from http://mantto-telecom.com/blog_post20170722_05_eelectromagnetico.html

Mantua, N.J. (1999). The Pacific Decadal Oscillation. A brief overview for non-specialists, to appear in the Encyclopedia of Environmental Change.

Mantua N. J. y Hare S. R.(2002). The Pacific Decadal Oscillation. Journal of Oceanography, Vol. 58, pp. 35 to 44, 2002

Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (1997). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. El Niño-La Niña, 2000, 13-27.

Marshall G. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds) (2018). The Climate Data Guide: Marshall Southern Annular Mode (SAM) Index (Station-based). Retrieved from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/marshall-southern-annular-mode-sam-index-station-based.

MENA, P. A. ,C. JOSSE & G. MEDINA (Eds.). 2000. Los Suelos del Páramo. Serie Páramo 5. GTP/Abya Yala. Quito.

Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. (M. Moraes, B. Øllgaard, P. Kvist, F. Borchsenius, & H. Balsle , Edits.) Botánica Económica de los Andes Centrales, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. 91-109.

Mena V., P., Medina, G., Hofstede, R., & Proyecto Páramo (Eds.). (2001). Los Páramos del Ecuador: Particularidades, problemas y perspectivas. Editorial Abya Yala/Proyecto Páramo.

Mendoza, L. G. (2016). LA RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN Y LA VARIABILIDAD DEL CLIMA EN OAXACA: UNA HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DE ECOSISTEMAS. 5.

Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Díez, M. F., Schmindt, F., ... & Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. Pilquen-Sección Agronomía, (11), 5.

Millano, J., & Paredes, F. (2016). Variabilidad de la vegetación con el índice de diferencia normalizada (NDVI) en latinoamérica. Novum Scientiarum, 2, 33-44.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. 2013. Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.

Montalván Pérez, L. M. (2018). Análisis de las relaciones entre la precipitación, vegetación y el fenómeno ENOS en las subcuencas Machángara y Tomebamba del río Paute (Bachelor's thesis). Retrieved from http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30598

Morales, P. (2011). El coeficiente de correlación. Retrieved from http://www.unizar.es/ice/images/stories/materiales/curso_06_2016/01.%20Documento%201%20(correlaciones).pdf

Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J. I., Aguilar, E., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., ... & Vicente-Serrano, S. M. (2016). Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011). International Journal of Climatology, 36(11), 3839-3855.

Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Retrieved from http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n,%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1

Muñoz, A. R., Cipriotti, P., & Radic, S. S. (2017). Land surface phenology trends of the Isla Grande de Tierra del Fuego from 15 years MODIS data. 1–4. https://doi.org/10.1109/grss-chile.2017.7996011

NASA (Ed.) 2011. Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA´s Goddard Space Flight Center in Greenbelt, 186 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/wpcontent/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf)

Neill, D. A. 1999. Geography. Pp. 2-5. En: Jørgensen, P. M., León-Yánez, S. (eds.). Catalogue of the vascular plants of Ecuador. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. 75: i-viii, 1–1182.

Obeysekera, Jayantha & Park, Joseph & Irizarry, Michelle & Trimble, Paul & Barnes, Jenifer & VanArman, Joel & Said, Winnie & Gadzinski, Erik. (2011). Projected Trends in Climate and Sea Level for South Florida.. 10.13140/2.1.2345.0887.

Oliver, M. A. . 1990."Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". International Journal of Geographic Information Systems 4: 313–332

OMM. (2013). Tiempo. Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de: http://www.wmo.int/pages/themes/weather/index_es.html

Pabón Caicedo, José Daniel and Dorado Delgado, Jennifer (2008) Intraseasonal variability of rainfall over northern south america and caribbean region. Earth Sciences Research Journal; Vol. 12, núm. 2 (2008); 194-212 Earth Sciences Research Journal; Vol. 12, núm. 2 (2008); 194-212 2339-3459 1794-6190 .

Paegle, J.N., Byerle, L.A., Mo, K.C. (2000). Intraseasonal Modu-lation of South American Summer Precipitation. Monthly Weather Review . 128 (3): 837-850

Paula, P. A., Zambrano, L., & Paula, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. Enfoque UTE, 9(2), 125-137.

Paz Pellat, F., Romero Sanchez, M. E., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., Valdez Lazalde, J. R., & Aldrete, A. (2015). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: Análisis de índices de banda ancha. Terra

Latinoamericana, 33(1), 27–49.

Pohl, B., Fauchereau, N., Reason, C. J. C., & Rouault, M. (2010). Relationships between the Antarctic Oscillation, the Madden–Julian oscillation, and ENSO, and consequences for rainfall analysis. Journal of Climate, 23(2), 238-254.

Potter, C., Boriah, S.Steinbach, M., Kumar, V., & Klooster, S. (2008). Terrestrial vegetation dynamics and global climate controls.Climate Dynamics, 31(1), 67-78.

Pourrut, P. (1983). Los Climas del Ecuador – Fundamentos explicativos. Orstom. Quito, Ecuador.

Pourrut, P. (Ed.) 1995. El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía. Quito: Colegio de Geógrafos del Ecuador : Corporación Editora Nacional.

Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, F., Barco, O., & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. Meteorología Colombiana, 6, 121-130.

Quinn, W.H. y V.T. Neal. (1992). The historical record of El Nino events. En: R.S. Bradley y P.D. Jones (eds.) Climate since A.D. 1500. Routledge: London, pp. 623-648.http://gcmd.gsfc.nasa.gov/KeywordSearch/Metadata.do?Portal=GCMD&KeywordPath=&EntryId=NOAA_WDCPALEO_CLIM1500_CH32&MetadataView=Data&MetadataType=0&lbnode=mdlb3

Ramsay P.M. (1992). The páramo vegetation of Ecuador: The community ecology, dynamics and productivity of tropical grasslands in the Andes. University of Wales.

Ricarde, R. (2019). Los efectos de la topografía sobre el clima. Ciencia de Hoy. https://cienciadehoy.com/los-efectos-de-la-topografia-sobre-el-clima/

Rossel F. (1997). Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Équateur. Université de Montpellier II, France, Thèse de doctorat n°122, 280 p + annexes

Sánchez García, A., & Toral Ruiz, N. (2016). Análisis de las capacidades de los

sistemas Landsat para la actualización cartográfica. Estudios de caso práctico. 144 Madrid: Titulación de ingeniería técnica en topografía- Escuela de Geodesia y Cartografía.

Sánchez-Santillán, N., Signoret-Poillon, M., & Garduño-López, R. (2006). La Oscilación del Atlántico Norte: Un fenómeno que incide en la variabilidad climática de México. Ingeniería, investigación y tecnología, 7(2), 85-95.

Schneider, T. (2006). The general circulation of the atmosphere. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 34: 655–688.

Stella, J. L. (2018). Patrones mensuales de precipitación y temperatura media asociados a la oscilación antártica (AAO) o modo anular del sur (SAM) sobre el territorio argentino. 2.

Thompson, David W. J.; Solomon, Susan; Kushner, Paul J.; England, Matthew H.; Grise, Kevin M.; Karoly, David J. (2011). "Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change". Nature Geoscience. 4 (11): 741–749. doi:10.1038/ngeo1296. ISSN 1752-0894.

Trickey, M., Cornejo-Grunauer, M. P., & Cedeño, J. (2010). EVALUACIÓN DE LA OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN EN LA PREDICCIÓN DE NIVELES DE PRECIPITACIÓN DE LA COSTA ECUATORIANA.

Vallejo García, B. D., & Ramírez Cuasque, L. I. (2018). Influencia de los patrones climáticos globales en la variabilidad del clima durante el período 2000-2016 en los páramos del Norte de Ecuador (Bachelor's thesis).

Van Leeuwen, W., Hartfield, K., Miranda, M., & Meza, F. (2013). Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. Remote Sensing, 5(3), 1177-1203. https://doi.org/10.3390/rs5031177

Varela, L. A., Ron, S. R. 2018. Geografía y clima del Ecuador. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de: https://bioweb.bio/geoclima/

Veettil, B. K., Maier, É. L. B., Bremer, U. F., & de Souza, S. F. (2014). Combined

influence of PDO and ENSO on northern Andean glaciers: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano, Ecuador. Climate dynamics, 43(12), 3439-3448.

Ventrice, M.; Wheeler M.; Hendon, H.; Schreck, C.; Thorncroft, C. & Kiladis; G. (2013). A modified multivariate Madden Julian Oscillation 1 index using velocity potential. Monthly Weather Review. Diciembre 2013, Vol. 141, No. 12. pp. 4197-4210.

Vicente-Serrano, S. M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., … Nieto, R. (2016). The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. Climate Dynamics, 48(1-2), 405–427. doi:10.1007/s00382-016-3082-y

Vuille M, Bradley RS, Keimig F (2000b) Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. J Clim 13:2520–2535

Wolter, K. y Tomlin, M.S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). International Journal of Climatology, 31:1074-1087.

Yao, Jiahui & Xiao, Linxiang & Gou, Mengmeng & Li, Chao & Lian, Ergang & Yang, Shouye. (2018). Pacific decadal oscillation impact on East China precipitation and its imprint in new geological documents. Science China Earth Sciences. 61. 10.1007/s11430-016-9146-2.

Zhang, C. (2005): Madden-Julian Oscillation. Reviews of Geophysics, 43, 1-36.

Zhang, Y., J. M. Wallace and D.S. Battisti (1997), "ENSO–like interdecadal variability", J. Climate, no. 10, pp. 1004–1020.