



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

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

Tesis previa a la obtención
del título de
Master en Geomática
con mención en
Ordenamiento Territorial

Autor: Ing. Juan Armando Maita Chamba
Directora: María Pilar Martín Isabel Ph.D.

Cuenca, Ecuador
2015

DEDICATORIA

A mi familia Juan, Marcela y Fernando.

Amigos/as.

Los quiero y los estimo mucho.

AGRADECIMIENTOS

De antemano MUCHAS GRACIAS a todas las personas que de alguna forma colaboraron en el desarrollo y finalización de la presente tesis, así como un agradecimiento especial:

A la Universidad del Azuay, a todo el cuerpo de profesores/as de la Maestría de Geomática con Mención en Ordenamiento Territorial, al Ing. Omar Delgado Director de la presente maestría, a mis amigos/as del IERSE, Priscila Samaniego, Chester Sellers, Diego Pacheco, Julita Martinez, Don Luchito, Mario Merchán, Dianita Matute, Francisco Salgado, Paúl Ochoa, Julita Martínez, gracias por su amistad y apoyo.

A mis amigo/as del Programa de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de la Universidad Nacional de Loja, Nikolay Aguirre Ph.D. como director del programa, Paul Eguiguren, Tatiana Ojeda, Natalia Samaniego, Jaime Santín y Narcisa Urgiles por su constante apoyo, consejos y amistad brindada.

Finalmente, a María Pilar Martín Isabel Ph.D. por su participación como Directora de la Tesis, apoyando con sus conocimientos y tiempo para abordar los temas del presente trabajo de investigación.

1	INTRODUCCIÓN	10
2	METODOLOGÍA	13
2.1	Área de Estudio	13
2.2	Información geoespacial.....	15
2.3	Programas utilizados	16
2.4	Análisis de series temporales.....	16
2.4.1	Pre análisis de Datos	17
	• Descarga de Datos.....	17
	• Evaluación de calidad de los píxeles de EVI	18
	• Detección y corrección de correlación serial	18
2.4.2	Análisis descriptivo de la serie temporal MODIS-EVI	19
2.4.3	Análisis de la tendencia temporal del EVI.....	19
2.4.4	Correlación de datos EVI con precipitación y temperatura.	20
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1	Evaluación de la calidad de los píxeles EVI	22
3.2	Análisis descriptivo de la serie temporal MODIS-EVI.....	24
3.3	Análisis de la tendencia temporal del EVI	34
3.4	Correlación de datos EVI con precipitación y temperatura.....	40
4	CONCLUSIONES	44
5	BIBLIOGRAFÍA	45

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁG.

Figura 1. Localización de los ecosistemas evaluados en las zonas de planificación 6 y 7 de Ecuador.....	13
Figura 2. Esquema de procedimientos realizados en la identificación de tendencias y magnitudes de cambio del EVI.	17
Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura utilizadas en el estudio	20
Figura 4. Resultados del control de calidad aplicado a las imágenes EVI. A) Ubicación espacial del porcentaje total de píxeles inválidos, B) Ubicación espacial del número de GAP's o intervalos inválidos para interpolar temporalmente un dato EVI.	22
Figura 5. Porcentaje del área de las provincias con presencia de píxeles inválidos durante el periodo 2000 – 2014.....	23
Figura 6. Porcentaje del área de los ecosistemas y zonas deforestadas con presencia de píxeles inválidos durante el periodo 2000 – 2014.....	23
Figura 7. Valores de media y desviación estándar del EVI obtenidos en los ecosistemas y zonas deforestadas evaluadas, para el periodo 2000 - 2014.....	25
Figura 8. Valores de media y desviación estándar del EVI obtenidos en las provincias evaluadas, para el periodo 2000 – 2014.....	27
Figura 9. Serie temporal media mensual de EVI de ecosistemas y zonas de deforestación, para el periodo 2000-2014. La línea roja indica la dirección de la tendencia de la serie temporal EVI que se identifica en la línea color verde.....	28
Figura 10. Serie temporal media mensual de EVI calculado para las provincias evaluadas, para el periodo 2000-2014. La línea roja indica la dirección de la tendencia de la serie temporal EVI que se identifica en la línea color verde.....	29
Figura 11. Serie temporal interanual de EVI de los ecosistemas, zonas de deforestación y provincias, para el periodo 2000 – 2014.....	30

Figura 12. Serie temporal del Índice Multivariado ENSO, para el periodo 2000 – 2014. Los valores negativos en azul representan la fase fría del ENSO (La Niña), los valores positivos en rojo representan la fase caliente del ENSO (El Niño).	31
Figura 13. Anomalías de precipitación en el periodo lluvioso enero – mayo, para el año 2010. Las áreas con tonos cafés representan una anomalía negativa en la precipitación, mientras que los tonos verdes una anomalía positiva (Palacios et al. 2014).	32
Figura 14. Serie estacional de EVI de los ecosistemas, zonas de deforestación y provincias para el período enero – diciembre. Construido en base a datos desde el año 2000 al 2014.....	33
Figura 15. Magnitud de la pendiente del estimador Theil-Sen de la zona de estudio.....	35
Figura 16. Significancia de las tendencias negativas y positivas de EVI a través del test CMK.....	36
Figura 17. Áreas con cambios negativos y positivos de EVI estadísticamente significativos	37
Figura 18. Porcentaje de superficie acumulada de tendencias negativas y positivas, significativas y no significativas a) en los ecosistemas y zonas deforestadas, b) en las provincias evaluadas.	39
Figura 19. Estaciones con aumento significativo de precipitación, en el periodo 2000-2014.....	40
Figura 20. Estaciones con aumento significativo de temperatura, en el periodo 2000-2014.....	41
Figura 21. Distribución espacial de los resultados de correlación y significancia de los datos de precipitación y temperatura con los datos de EVI: A) Estaciones de precipitación B) Estaciones de temperatura.	43

Tabla 1. Ecosistemas seleccionados de la zona de estudio.	14
Tabla 2. Estadísticas descriptivas de los datos EVI en cada uno de los ecosistemas, zonas de deforestadas y provincias incluidos en el estudio.	24
Tabla 3. Resultados MKC y TS de las tendencias del EVI en los ecosistemas, deforestación y provincias evaluados.....	38
Tabla 4. Coeficientes de correlación y significancia entre los valores de EVI y la precipitación media mensual de las 41 estaciones analizadas. La significancia esta expresada por: (*) $p < 0.05$, (**) $p > 0.05$	41
Tabla 5. Coeficientes de correlación y significancia entre los valores de EVI y la temperatura media mensual de las 15 estaciones analizadas. La significancia esta expresada por: (*) $p < 0.05$, (**) $p > 0.05$	42

RESUMEN

El siguiente estudio constituye la evaluación de la dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los ecosistemas de la Región Sur del Ecuador, utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS de los satélites Aqua (MYD13Q1) y Terra (MOD13Q1), así como la correlación entre este índice y datos de temperatura y precipitación mensuales de 41 estaciones meteorológicas provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), durante el periodo 2000 – 2014. La tendencia del EVI fue analizada a través del método no paramétrico de Mann- Kendall Contextual (MKC), su magnitud con el método Theil – Sen (TS) y la correlación del EVI con la precipitación y la temperatura a través del coeficiente de Pearson.

Siete ecosistemas presentaron un cambio negativo estadísticamente significativo ($p < 0.05$) del EVI mayor al 50 % de su superficie. El ecosistema con mayor cambio negativo fue el *Arbustal siempreverde* y *Herbazal del Páramo* (AsSn01) presentándose en el 75% de su superficie; y el mayor cambio positivo en el ecosistema Intervención en el 8.2% de su área. Con relación a las provincias, Zamora Chinchipe presentó en el 50.4% de su superficie la mayor tendencia negativa estadísticamente significativa, Cañar la mayor tendencia positiva en el 15% de su área y por último las Zonas de Deforestación obtuvieron tendencias negativas en el 43.5% de su área.

Palabras clave: ecosistemas, Ecuador, EVI, MODIS, Terra, Aqua, series temporales.

ABSTRACT

This study is about the evaluation of the Enhanced Vegetation Index (EVI) spatiotemporal dynamic in the ecosystems of the Southern Region of Ecuador, using satellite imagery from MODIS sensor of Aqua (MYD13Q1) and Terra (MOD13Q1) satellites, and the correlation between this index, temperature data and monthly rainfall of 41 weather stations from the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) during 2000 to 2014. The EVI trend was analyzed through the Contextual Mann-Kendall (CMK) nonparametric method; its magnitude through the Theil - Sen (TS) method; the EVI correlation by means of precipitation, and the temperature through the Pearson coefficient. Seven ecosystems showed a statistically significant negative change ($p < 0.05$) of EVI higher to 50% of its surface. The ecosystems with a more negative change were *Arbustal siempreverde* and *Herbazal del Páramo* (AsSn01) appearing in 75% of their surface; and the largest positive change in the intervention ecosystem in 8.2% of its area. With regard to the provinces, Zamora-Chinchipe presented the major statistically significant negative trend in 50.4% of its area; Cañar the most positive trend in 15% of its area; and finally, the Deforestation Zones obtained negative trends in 43.5% of their area.

Keywords: Ecosystems, Ecuador, EVI, MODIS, Terra, Aqua, Time Series.



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

1 INTRODUCCIÓN

La evaluación de cómo los cambios ambientales afectan a la distribución y dinámica de los ecosistemas se está convirtiendo en una herramienta cada vez más importante, pues permite mejores predicciones de los efectos del calentamiento global, la reducción de la biodiversidad o la degradación de los hábitats. Los sensores remotos multiespectrales e hiperespectrales juegan un rol fundamental en el estudio de los ecosistemas a diferentes escalas espaciales y temporales (Bohn et al. 2012, He et al. 2014), como el mapeo de humedales, medición de la fisiología y estructura de las plantas, evapotranspiración, cambios de uso de la tierra y clasificación de la vegetación, incendios forestales, biomasa, ciclo del carbono, deforestación, entre otros. (Govender et al. 2007, Chuvieco 2008a, García-Mora et al. 2012, Waylen et al. 2014, Czerwinski et al. 2014)

El uso de datos del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de las plataformas Terra y Aqua han demostrado una gran importancia para la detección de cambios en la cobertura de la Tierra, incluyendo el seguimiento de fenómenos de gran repercusión ambiental como los incendios forestales y la cubierta de hielo. Su resolución espacial, espectral y temporal lo hacen también idóneo para otras aplicaciones como el estudio de los océanos y la atmósfera (cubierta nubosa, concentración de aerosoles, etc.) (Justice et al. 2002, Lunetta et al. 2006, Chuvieco 2008b, Shao et al. 2011, García-Mora et al. 2012). Este sensor cuenta con una resolución espacial de 250, 500 y 1000m y adquiere información en 36 bandas espectrales de las cuales 7 son de gran interés para estudiar la cobertura terrestre. Al operar de forma simultánea en dos plataformas, Terra y Aqua, es posible disponer de imágenes de toda la superficie terrestre con una frecuencia diaria. Existen una gran cantidad de productos disponibles derivados de los datos captados originalmente por el sensor MODIS (García-Mora y Mas 2011). Entre estos productos están los índices de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y EVI (Enhanced Vegetation Index).

Los índices de vegetación han demostrado una alta relación con parámetros como el índice de área foliar (LAI), la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR) por la vegetación y otros factores relacionados con la cubierta vegetal (Jinguo y Wei 2004), habiéndose utilizado con frecuencia para estimar la biomasa y monitorear la degradación de la vegetación sobre grandes áreas (Javzandulam et al. 2005). Tanto el NDVI como el

EVI han demostrado un buen rango dinámico y sensibilidad para el seguimiento y la evaluación de las variaciones espaciales y temporales en la cantidad y condiciones de la vegetación (Huete et al. 2002, Rigina y Rasmussen 2003). Sin embargo el EVI corrige algunos efectos derivados de la nubosidad y los aerosoles en la atmósfera y además no se satura tan fácilmente como el NDVI cuando se observan zonas de vegetación densa y vigorosa como ocurre en la selva tropical y otras áreas de la Tierra (Roldán y Poveda 2006)

El uso de imágenes MODIS representa una alternativa económica, rápida y continua para el monitoreo de los ecosistemas terrestres a escala regional y/o global permitiendo una mayor frecuencia temporal y extensión espacial, aunque con una resolución espacial moderada.

Los ecosistemas juegan un papel fundamental en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. El mantenimiento de sus funciones garantiza la sostenibilidad ambiental, económica y social (Velásquez Milla 2010). El Ecuador es reconocido a nivel mundial por su riqueza florística y faunística (de la Torre et al. 2012, Ponman y Bussmann 2012, Lessmann et al. 2014), la cual está asociada a una serie de variables climáticas y topográficas (Herzog et al. 2011, Bendix et al. 2013) que interactúan y dan origen a diferentes paisajes naturales que conviven con varios tipos de vegetación y permanentes amenazas dadas por una continua y persistente presión del ser humano sobre los recursos naturales (MAE 2013). La evaluación y el monitoreo de los ecosistemas es importante como herramienta de planificación de acciones de protección y conservación (Padron y Navarro-Cerrillo 2007, Echeverry y Harper 2009); sin embargo en nuestro país es incipiente y a la vez urgente realizar este tipo de estudios. Los análisis temporales de índices de vegetación (EVI) a través del uso combinado de sistemas de información geográfica y datos de sensores remotos, es una herramienta rápida y eficaz para obtener información precisa y actualizada del estado de conservación de los ecosistemas de la Región Sur del Ecuador.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento temporal del producto EVI derivado de datos MODIS en los ecosistemas de las Zonas de planificación 6 y 7 de Ecuador, durante el periodo 2000 – 2014, mediante la utilización

de imágenes captadas por el sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua. Para abordar este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el comportamiento espacial y temporal (mensual, estacional e interanual) del índice EVI en las zonas de planificación 6 y 7 en los ecosistemas evaluados.
- Cuantificar tendencias de aumento o disminución de los valores del EVI en los ecosistemas del estudio durante el período de evaluación.
- Evaluar la relación entre el patrón temporal del índice EVI y los datos de precipitaciones y temperatura de estaciones meteorológicas incluidas en el área de estudio, mediante el uso de técnicas de correlación.

2 METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio

El área de estudio corresponde a las zonas de planificación seis y siete en el sur de Ecuador y abarca un área de 62,873 km². La zona de planificación seis comprende las provincias de Cañar, Azuay y Morona Santiago mientras que la zona de planificación siete integra las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe. Geográficamente se ubica entre los paralelos -1.4° y -5.0° de latitud sur y los meridianos -76.6° y -80.4° de longitud oeste, datum WGS84 (Figura 1).

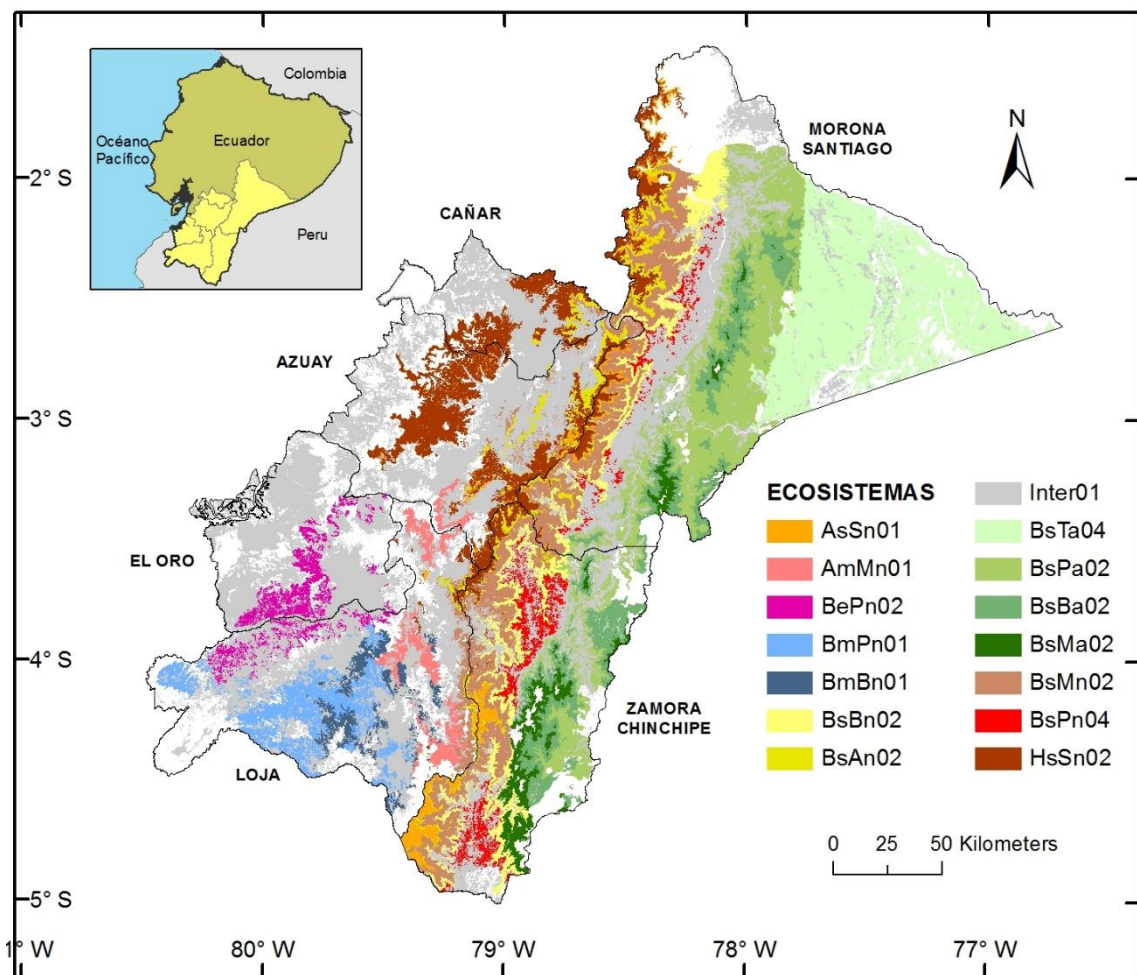


Figura 1. Localización de los ecosistemas evaluados en las zonas de planificación 6 y 7 de Ecuador.

La zona de estudio cuenta con un amplio rango altitudinal que oscila entre los 0 a 5,290 msnm. La temperatura media anual varía desde 1 °C en el volcán Sangay hasta los 26°C

en la zona costera de la provincia de El Oro y la zona amazónica de la provincia de Morona Santiago; mientras que la precipitación media anual oscila entre 0 a 5,500 mm. En la zona están presentes 64 de los 91 ecosistemas terrestres identificados por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) en el Mapa de Ecosistemas de Ecuador Continental, entre los cuales se puede mencionar por su importancia ecológica: Manglar Jama – Zapotillo, Herbazal del Páramo, Arbustal Desértico del Sur de los Valles, Bosque Inundable de la Llanura Aluvial de los Ríos de Origen Andino y de las Cordilleras Amazónicas.

La población existente en las dos zonas de planificación es de 2,226,252 habitantes, siendo las ciudades más pobladas: Cuenca con 331,888 habitantes, Machala con 241,606 habitantes y Loja con 180,617 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Censos - INEC 2010).

El presente estudio se centró en los 15 ecosistemas más representativos en cuestión de extensión geográfica de los 64 existentes en las dos zonas de planificación (Tabla 1). Los ecosistemas seleccionados representan el 82.1 % (51,600.1 km²) de la superficie total de la zona de estudio. Adicionalmente, se realizaron los mismos análisis en polígonos de Deforestación identificados por el Ministerio del Ambiente en el periodo 2000 – 2014 (4,110.6 km²), y a nivel de cada una de las seis provincias que conforman la zona de estudio.

Tabla 1. Ecosistemas seleccionados de la zona de estudio.

Ecosistema	CÓDIGO	Área (km ²)	%
Intervención	Inter01	19,907.4	38.6
Bosque siempreverde de tierras bajas del Abanico del Pastaza	BsTa04	5,749.9	11.1
Bosque siempreverde piemontano de las cordilleras del Cóndor-Kutuku	BsPa02	5,234.1	10.1
Bosque siempreverde montano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	BsMn02	3,979.9	7.7
Herbazal del Páramo	HsSn02	3,845.6	7.5
Bosque siempreverde montano bajo de las cordilleras del Cóndor-Kutuku	BsBa02	2,554.3	5.0
Bosque siempreverde montano bajo del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	BsBn02	2,104.4	4.1
Bosque semideciduo piemontano del Catamayo-Alamor	BmPn01	1,619.2	3.1
Bosque siempreverde montano alto del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	BsAn02	1,168.2	2.3
Bosque siempreverde piemontano del Sur de la Cordillera Oriental de los Andes	BsPn04	1,093.6	2.1
Bosque siempreverde montano de las cordilleras del Cóndor-Kutuku	BsMa02	1,003.9	1.9
Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor	BePn02	971.2	1.9
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	AsSn01	899.2	1.7
Arbustal semideciduo del sur de los Valles	AmMn01	808.6	1.6
Bosque semideciduo montano bajo del Catamayo-Alamor	BmBn01	660.6	1.3
TOTAL		51,600.1	100

2.2 Información geoespacial

Para la generación de los resultados del presente trabajo se utilizaron los siguientes datos:

- Imágenes del sensor MODIS del satélite Terra (342 imágenes, desde el 18/02/2000 al 19/12/2014) y Aqua (288 imágenes, del 04/07/2002 al 27/12/2014), específicamente los productos EVI MOD13Q1 y MYD13Q1 respectivamente, con una resolución de espacial de 250 m y temporal de 8 días. El uso combinado de los datos Terra y Aqua nos permitió contar con un mayor número de imágenes disponibles en los años en los que las dos plataformas han operado de forma conjunta.

El EVI es un índice espectral desarrollado para optimizar la señal de la vegetación mejorando su sensibilidad en regiones de alta biomasa (donde el NDVI se satura). Éste índice es menos sensible a los efectos del suelo y de la atmósfera (Waring et al. 2006, Jiang et al. 2008). Incorpora el concepto de resistencia atmosférica como en el ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) y minimiza las influencias del brillo del suelo como en el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) que se utiliza en regiones áridas donde la cubierta de la vegetación es escasa (Solano et al. 2010). Su formulación es la siguiente:

$$EVI = G \frac{NIR - R}{NIR + C_1R - C_2B + L}$$

Donde NIR, R y B son las bandas de reflectividad infrarrojo cercano, roja y azul respectivamente; $L=1$ es un factor de ajuste del suelo; $C_1=6$ y $C_2=7.5$ son coeficientes de corrección atmosférica que utilizan la información del canal azul para realizar una corrección del efecto de los aerosoles sobre el canal rojo, $G=2.5$ es un factor de ganancia (Matsushita et al. 2007, Jiang et al. 2008).

- Cartografía digital del Sistema de Clasificación de Ecosistemas de Ecuador Continental a escala 1:100,000, la misma que contiene 91 ecosistemas, y fue generada a través de factores de diagnóstico como fisionomía, bioclima,

biogeografías, geoformas, inundabilidad general, fenología y pisos bioclimáticos (MAE 2013).

- Cartografía digital de la Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, del periodo 2000-2014, escala 1:100,000.
- Información meteorológica (medias mensuales) de 11 estaciones para temperatura y 41 para precipitación desde el año 2000 hasta el 2014, la cual fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

2.3 Programas utilizados

Para el tratamiento de la información en las distintas fases del estudio se utilizaron los siguientes programas informáticos:

- *TiSeG* (Colditz et al. 2008): herramienta en lenguaje de programación IDL, para la generación de las series temporales de EVI, utilizando controles de calidad de píxeles e interpolación temporal para el relleno de datos.
- *Idrisi Selva (Clark Labs, USA)*: para la composición de las series temporales, análisis de correlación serial, Durbin Watson, Trend Preserving Prewhitening, eliminación de ruido mediante filtro temporal de media.
- *ArcGis v10.3 (ESRI, USA)*: edición final de mapas
- *RStudio v0.98.1103 (RStudio-Open source)*: entorno de programación en R en el cual se escriben y ejecutan los comandos del paquete Climatol
- *Climatol v2.2 (<http://www.climatol.eu/>)*: paquete de programación en R, para el relleno y homogenización de series de información climática de temperatura y precipitación.
- *Infostat v2008 (UNC, Argentina)*: para el cálculo de estadísticas.

2.4 Análisis de series temporales

Para el procesamiento y análisis de los datos del estudio se siguió el proceso metodológico que se detalla en la Figura 2 y que se describirá con detalle en los siguientes epígrafes.

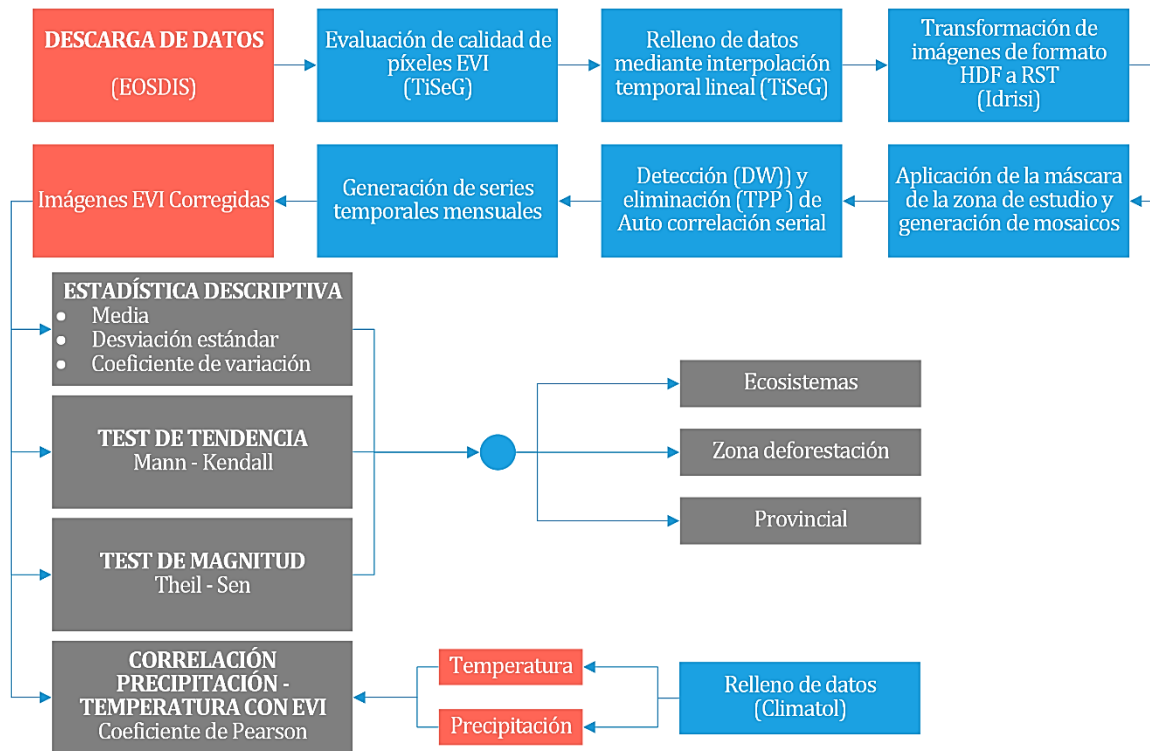


Figura 2. Esquema de procedimientos realizados en la identificación de tendencias y magnitudes de cambio del EVI.

2.4.1 Pre análisis de Datos

• Descarga de Datos

Las imágenes MODIS se descargaron del sitio web <http://reverb.echo.nasa.gov/> (EOSDIS), que funciona bajo el Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA. En este sistema, la cobertura global de imágenes MODIS se organizan en *tiles*. Un “Tile” es un registro que define la ubicación de la imágenes MODIS en el plano horizontal y vertical de una cuadrícula de 10 x 10 grados en proyección sinusoidal y que sirve para la fácil ubicación de las escenas a nivel mundial (Myneni 2012). Los “Tiles” correspondientes a nuestra zona de estudio son h09v09 y h10v09 y el formato de descarga digital es HDF-EOS.

- **Evaluación de calidad de los píxeles de EVI**

Para la evaluación de calidad y generación de series de datos de píxeles de EVI, se utilizó la aplicación TiSeG (Colditz et al. 2008), en conjunto con el set de fiabilidad de datos “pixel reliability summary QA”, que asigna a cada píxel de la serie un valor de -1 a 3 en función de su calidad: -1 (valor de relleno, no procesado), 0 (buen dato, usar con confianza), 1 (dato marginal, útil pero observar otra información de calidad QA), 2 (nieve/hielo, píxel cubierto por nieve/hielo), 3 (nublado, cubierta no visible, cubierta con nubes). Los píxeles de EVI con valores QA de 0, 1 se mantuvieron, mientras que los píxeles con valores 2 y 3 fueron eliminados. Posteriormente las lagunas de datos se rellenaron mediante una interpolación temporal lineal utilizando una ventana de intervalos de tiempo (GAPS) con un umbral máximo de 5 imágenes, tomando en consideración que cada imagen tiene una resolución temporal de 16 días.

La ventana temporal fue calculada en base al informe de análisis de TiSeG, el cual indicó los lugares espacialmente y temporalmente, con menor y mayor concentración de intervalos de tiempo inválidos. Una vez generadas las nuevas series temporales con relleno de lagunas mediante interpolación para cada “Tile”, se utilizó el módulo Modisconv del programa Idrisi Selva para importar los archivos HDF, convertirlos a formato RST y elaborar los mosaicos. Para el corte de la información de la zona de estudio se utilizó el módulo Window de Idrisi Selva.

- **Detección y corrección de correlación serial**

La auto correlación serial es un problema que afecta a los análisis con series temporales de datos y se presenta cuando datos temporalmente adyacentes tienden a estar relacionados, aumentando (disminuyendo) la probabilidad de detección de tendencia cuando la autocorrelación es positiva (negativa) (Neeti y Eastman 2011, Erasmi et al. 2014). Para su detección se utilizó el análisis del módulo Durbin – Watson de Idrisi Selva el cual examina y detecta la presencia de auto correlación serial de primer orden en una serie de imágenes o una serie de residuos de una regresión. El resultado de la prueba arroja valores de 0 a 4 donde valores de 2 indican que no hay autocorrelación,

valores menores a 2 indican una evidencia de autocorrelación positiva y valores mayores de 2 indican autocorrelación negativa (Eastman 2012).

Para el presente trabajo se tomó como umbrales de 1.75 a 2.25 como ausencia de autocorrelación. El resultado del análisis ofreció un valor de 1.235 (periodo 2000 - 2002, satélite Terra) y 1.694 (periodo 2003 – 2014, satélites Terra y Aqua), por lo cual se confirmó la presencia de una autocorrelación con tendencia positiva de los datos por lo que se utilizó el módulo Trend Preserving Prewhitening para corregir este efecto. El Prewhitening (pre blanqueo) es un método usado para prevenir falsas indicaciones de tendencia, eliminando la correlación serial de primer orden en el componente erróneo (ruido) de la serie (Yue y Wang 2002, Zhang et al. 2012, Erasmi et al. 2014), mientras que la tendencia en los datos de EVI son conservados. Este método disminuye el tamaño de la muestra por uno sin embargo se recupera mediante la transformación Prais-Winsten aplicado en el módulo (Eastman 2012).

2.4.2 Análisis descriptivo de la serie temporal MODIS-EVI

Una vez depurada la serie temporal, se utilizaron técnicas de estadística descriptiva, calculando parámetros como la media, desviación estándar y coeficiente de variación mensual, estacional e interanual de los doce años para identificar y caracterizar el comportamiento de patrones espacio temporales (Brando et al. 2010).

2.4.3 Análisis de la tendencia temporal del EVI

Para calcular la tendencia de incremento o decremento del EVI en el tiempo, se aplicó el test no-paramétrico de tendencias de **Mann-Kendall Contextual (MKC)**, el cual estudia la homogeneidad de los valores desde el punto de vista de tendencias negativas o positivas de una serie de datos considerando el número de veces en que cada mes, estación o año es mayor o menor que el dato precedente (Alcaraz-Segura y Baldi 2008, Caballera Lopez 2013). El MKC es una extensión de la prueba de Mann-Kendall simple ampliamente utilizada para determinar tendencias. La diferencia básica respecto a la prueba simple es que en aquella los cálculos se realizan pixel por pixel, mientras que en la contextual el análisis se hace por matrices o kernels de varios píxeles (Bravo-Peña et al. 2013). Así, este test introduce información espacial de los píxeles vecinos que tienden

a presentar características similares en el análisis de cada pixel (Neeti e Eastman 2011). En el presente estudio se trabajó con 8 vecinos próximos.

El test MKC permitió evaluar la dirección de las tendencias y si dicha variación es significativa, pero no su magnitud, para esto se utilizó el método no paramétrico propuesto por Theil (1950) y modificado por Sen (1968). Con el test de **Theil – Sen (TS)** se logró estimar la tasa de cambio en las observaciones sobre el periodo de tiempo del estudio, calculando la pendiente entre cada combinación de pares y encontrando el valor medio entre todas las imágenes (Giner et al. 2009, Neeti e Eastman 2011, Eastman 2012b)

2.4.4 Correlación de datos EVI con precipitación y temperatura.

Para calcular los valores de correlación y significancia entre los datos de precipitación y temperatura y los valores de EVI de la serie temporal de imágenes MODIS se utilizó información media mensual de estaciones meteorológicas localizadas en la zona de estudio (Figura 3). Esta información fue facilitada por el INAMHI para el periodo de evaluación 2000 – 2014.

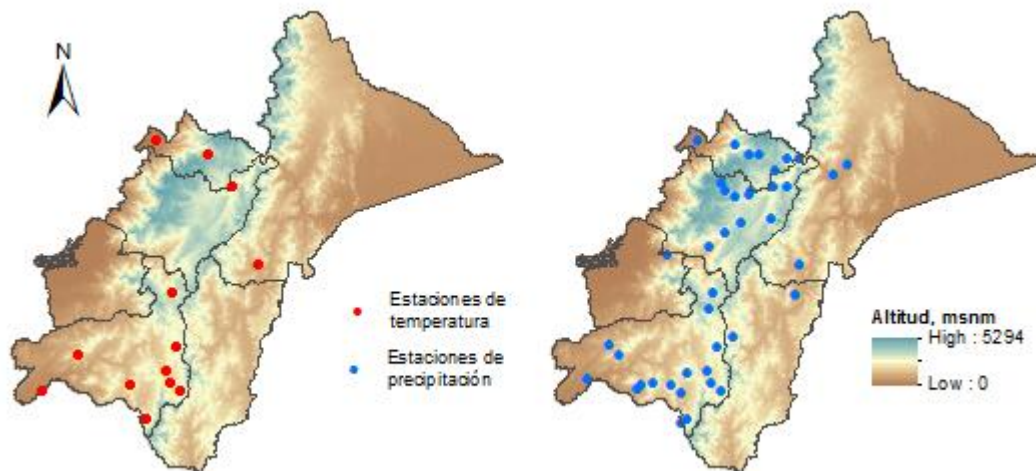


Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura utilizadas en el estudio

Una vez organizada la base de datos, se procedió a realizar un relleno de series utilizando el paquete Climatology en el entorno de programación RStudio. Primero se realizó un primer relleno con todas las estaciones para identificar qué estaciones

meteorológicas comparten datos similares mediante un dendrograma de clústeres de estaciones, el cual nos permitió agrupar estaciones para así realizar el relleno de los datos por grupos separados de acuerdo a su similitud y distribución espacial.

A partir de la serie temporal MODIS se extrajo la media mensual del índice EVI para un buffer de 5 km de radio desde el centro de cada estación analizada. Este radio de representatividad espacial del dato meteorológico es muy variable entre estaciones, condicionado principalmente por características topográficas. Córdoba et al. (2006) en un estudio de estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del Río Quito en el departamento del Chocó (Colombia) identificaron radios de representatividad entre 9.5 km y 57.6 km. En base a este trabajo y considerando la heterogenidad topográfica de la zona de estudio, decidimos utilizar un radio de representatividad más conservador.

Obtenidos los datos mensuales de precipitación, temperatura y EVI, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y su significancia, el cual es una medida de la magnitud de la asociación entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. Este coeficiente ofrece como resultado un valor que comprende de 1 a -1, donde un valor positivo denota una correlación lineal positiva, un valor negativo denota una correlación negativa, mientras que valores cercanos a 0 indican ausencia de correlación.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación de la calidad de los píxeles EVI

El control de calidad de los píxeles a través de la información “pixel reliability summary QA” y el uso de la aplicación TiSeG, arrojó diversos resultados a nivel espacial en cuanto a provincias y ecosistemas.

En la Figura 4 se puede observar el porcentaje de píxeles inválidos de todas las imágenes satelitales utilizadas en el periodo 2000 – 2014, donde las zonas de color rojo indican la predominancia de píxeles inválidos que se concentran en el flanco oriental y occidental de la Cordillera de los Andes, mientras que en las zonas de color azul disminuye la presencia de píxeles inválidos ubicados como patrón general la cuenca del Río Catamayo, parte alta de la cuenca del Río Jubones, el este de Morona Santiago y en los valles de Paute, Azogues y Gualaceo.

En relación al número de intervalos de tiempo inválidos (GAP's) necesarios para interpolar temporalmente un dato EVI, el 80% de la zona de estudio presento un rango entre 0 a 5 intervalos, un 18.2% de 6 a 10, un 1.6% de 11 a 15, un 0.1% de 16 a 20 y finalmente solo un 0.0004% de 21 a 25 intervalos.

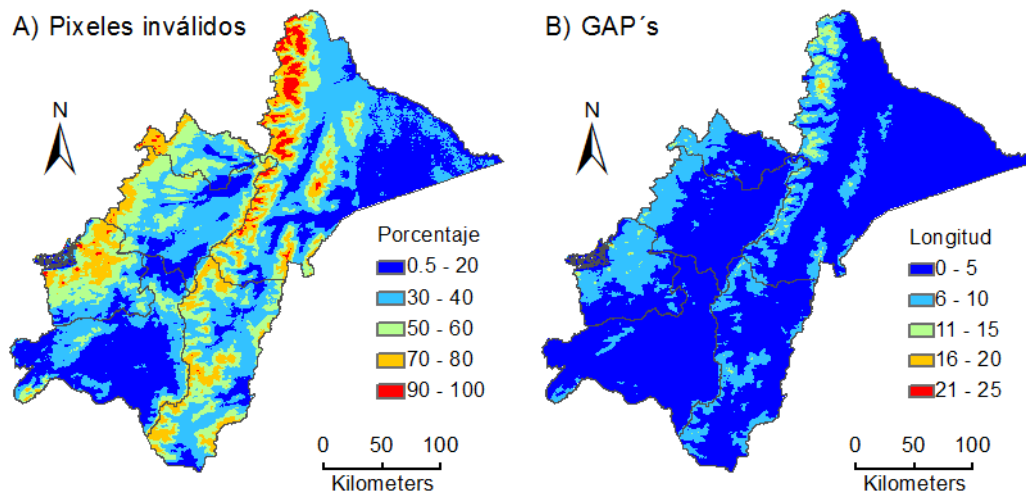


Figura 4. Resultados del control de calidad aplicado a las imágenes EVI. A) Ubicación espacial del porcentaje total de píxeles inválidos, B) Ubicación espacial del número de GAP's o intervalos inválidos para interpolar temporalmente un dato EVI.

El mismo análisis de porcentaje de píxeles inválidos se presenta a nivel de provincias (Figura 5), donde se observa que Loja obtuvo el mayor porcentaje de área (62%) con un porcentaje de ocurrencia de píxeles inválidos entre 0 a 20 %, mientras que Morona Santiago presento en un 5% de su territorio de 80 a 100% de ocurrencia la presencia de píxeles inválidos.

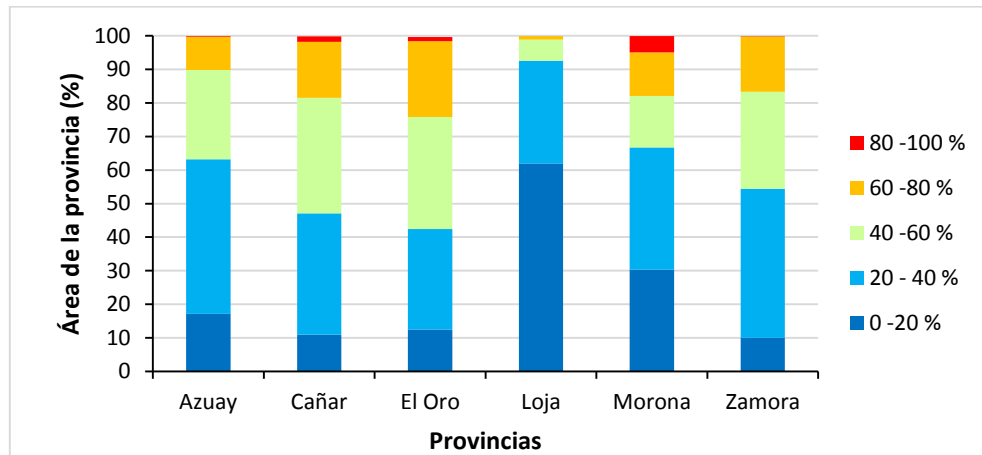


Figura 5. Porcentaje del área de las provincias con presencia de píxeles inválidos durante el periodo 2000 – 2014.

En relación a los ecosistemas (Figura 6) la mayor ocurrencia de píxeles inválidos (60 – 80%) se presentó en los ecosistemas AsSn01 en el 78.1% de su territorio, BsAn02 en el 53.9%, BsMa02 en el 40.1%, BsMn02 en el 42.8% y HsSn02 en el 27.4%. Por el contrario, la menor ocurrencia de píxeles inválidos (0 – 40%) se presentó en los ecosistemas AmMn01 en el 99.3% de su área, BmBn01 y BmPn01 en el 100% y BsTa04 en el 99.9%.

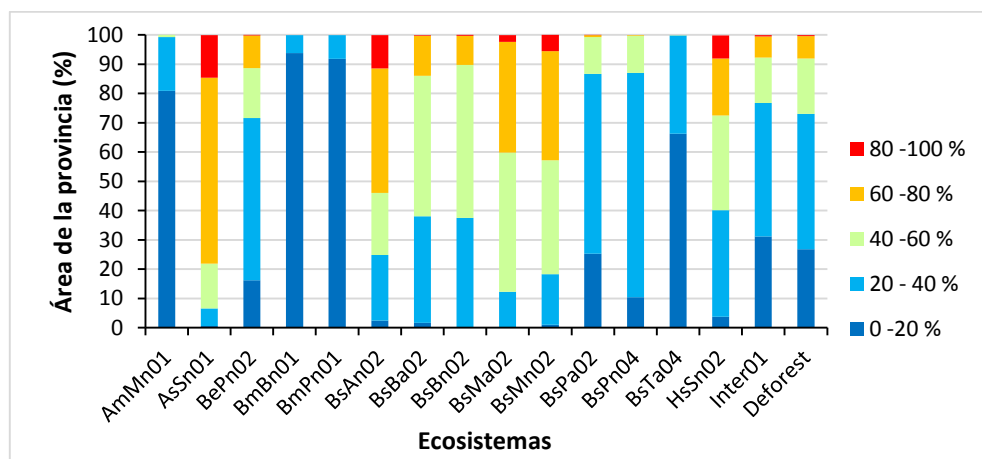


Figura 6. Porcentaje del área de los ecosistemas y zonas deforestadas con presencia de píxeles inválidos durante el periodo 2000 – 2014.

3.2 Análisis descriptivo de la serie temporal MODIS-EVI

La Tabla 2 muestra las estadísticas descriptivas de la serie temporal MODIS-EVI para los 15 ecosistemas, la Zona de Deforestación y las 6 provincias analizadas.

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de los datos EVI en cada uno de los ecosistemas, zonas de deforestadas y provincias incluidos en el estudio.

Variable	n	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Valor Mínimo	Valor Máximo	Mediana
ECOSISTEMAS							
Inter01	179	0.427	0.036	8.525	0.369	0.545	0.422
BsTa04	179	0.534	0.028	5.289	0.448	0.6	0.532
BsPa02	179	0.498	0.026	5.168	0.438	0.576	0.497
BsMn02	179	0.363	0.042	11.514	0.213	0.459	0.37
HsSn02	179	0.267	0.021	7.799	0.197	0.322	0.268
BsBa02	179	0.427	0.033	7.834	0.321	0.511	0.429
BsBn02	179	0.437	0.035	8.037	0.319	0.521	0.439
BmPn01	179	0.348	0.155	44.436	0.086	0.908	0.297
BsAn02	179	0.323	0.037	11.397	0.203	0.408	0.329
BsPn04	179	0.506	0.027	5.365	0.43	0.598	0.502
BsMa02	179	0.379	0.045	11.783	0.214	0.466	0.384
BePn02	179	0.428	0.069	16.231	0.242	0.602	0.423
AsSn01	179	0.265	0.042	15.66	0.127	0.341	0.274
AmMn01	179	0.298	0.065	21.914	0.197	0.446	0.288
BmBn01	179	0.353	0.082	23.224	0.205	0.591	0.331
DEFORESTACIÓN	179	0.463	0.032	6.851	0.397	0.593	0.455
PROVINCIAS							
Azuay	179	0.346	0.03	8.637	0.263	0.42	0.347
Canar	179	0.366	0.037	10.185	0.271	0.456	0.363
ElOro	179	0.389	0.06	15.332	0.256	0.563	0.385
Loja	179	0.351	0.089	25.435	0.209	0.651	0.322
Morona	179	0.469	0.027	5.825	0.397	0.546	0.469
Zamora	179	0.426	0.029	6.839	0.334	0.502	0.428

Como se puede observar, existe un comportamiento diferenciado del EVI en los ecosistemas analizados. Los valores mínimo y máximo de EVI se obtuvieron en el ecosistema BmPn01 (Bosque semidecuido piemontano del Catamayo-Alamor) con un 0.086 y 0.908 respectivamente. Igualmente, este posee la mayor desviación estándar con 0.155 entre todos los ecosistemas, evidenciando un alto grado de dispersión de los valores de EVI a nivel espacial y temporal lo cual indica que la vegetación tiene un

componente estacional muy marcado y muy diferente a lo largo del año. Este ecosistema se caracteriza por sus bosques deciduos y semideciduos, con árboles bajos a medios de hasta 16 metros de altura en compañía de abundantes lianas en los sectores de quebradas. Cuando se degrada este sistema por causa de incendios y agricultura, se transforma en un matorral semideciduo con un dosel entre 5 y 6 m con pocos árboles emergentes remanentes de la vegetación original (Galeas et al. 2010).

Con respecto a valores de media, el ecosistema AsSn01 (Arbustal siempreverde y Herbazal de Páramo) obtuvo el menor valor de EVI con 0.265 y el ecosistema BsTa04 (Bosque siempreverde de tierras bajas del Abanico del Pastaza) el valor más alto con 0.534. Cada uno de los ecosistemas y las zonas de deforestadas presentó medias y desviaciones estándar diferentes en función de las características particulares de su cobertura vegetal (Figura 7).

En cuanto a las zonas de deforestación, se obtuvo un valor EVI mínimo de 0.397, máximo de 0.593, media de 0.463, y una desviación estándar de 0.032. A nivel general son áreas con valores de EVI estables desde el punto de vista espacial y temporal, caracterizado en su mayoría por cultivos anuales, de temporada y pastizales.

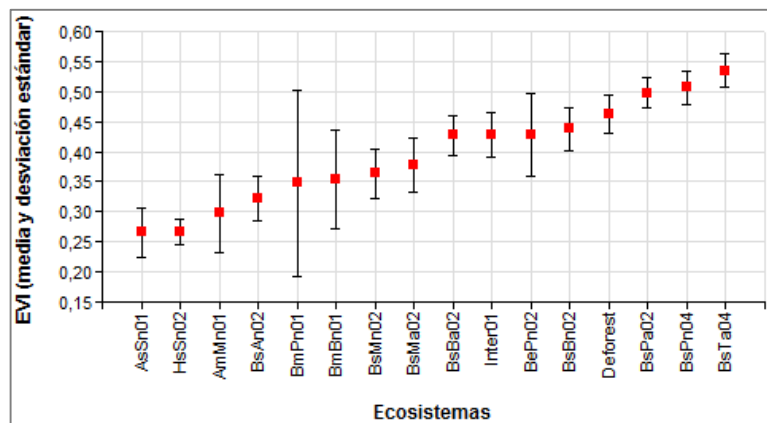


Figura 7. Valores de media y desviación estándar del EVI obtenidos en los ecosistemas y zonas deforestadas evaluadas, para el periodo 2000 - 2014

A nivel de provincias se observa en la Figura 8 que Loja obtuvo el menor valor de EVI con 0.209, un máximo de 0.651 y la mayor desviación estándar con 0.0898 con respecto a las demás provincias. Esto se debe en mayor parte a la presencia de dos ecosistemas

característicos que abarcan el 20.5 % de la superficie de la provincia, el Bosque semideciduo piemontano del Catamayo – Alamor (BmPn01) que es un bosque seco estacional con doseles arbóreos de 20 m de altura, abundantes arbustos y hierbas de temporada lluviosa. Algunas especies presentes son *Bauhinia aculeata*, *Centrolobium ochroxylum*, *Cochlospermum vitifolium*, *Machaerium millei*, *Pradosia montana*, *Senna mollissima*, *Triplaris cumingiana*, *Croton wagneri*, *Pisonia aculeate*, y una epífita predominante como la bromelia *Tillandsia usneoides*. También está presente el Bosque semideciduo montano bajo del Catamayo – Alamor (BmBn01) con doseles arbóreos que alcanzan de 12 a 15 m (*Eriotheca ruizii*, *Acacia macracantha*, etc.), donde se observan especies de la familia Cactaceae y en la parte baja del dosel crecen arbustos y hierbas, donde son comunes *Ipomoea carnea*, *Croton wagneri*, entre otras.

Por su parte, Morona Santiago obtuvo el mayor valor de media con 0.469 caracterizado por dos ecosistemas amazónicos principales, el Bosque siempreverde de tierras bajas del Abanico del Pastaza (BsTa04, 23.9% de la superficie de la provincia) con precipitaciones anuales entre 2346 a 3723 mm, temperatura media anual entre 24°C y 26°C y doseles arbóreos entre 18 y 30 m de alto. Un segundo ecosistema es el Bosque siempreverde piemontano de las cordilleras del Cóndor-Kutukú (BsPa02, 17.6% de la superficie de la provincia), con un dosel arbóreo de 20 m de alto, árboles emergentes mayores a 30 m de altura y abundancia de epifitas.

Por el contrario, la provincia de Azuay obtuvo el menor valor de media con 0.346, esto se debe a dos ecosistemas principales: las Zonas Intervenidas (Inter01, 45.6% de la superficie de la provincia) y el Herbazal del Páramo (HsSn02, 22.8% de la superficie de la provincia).

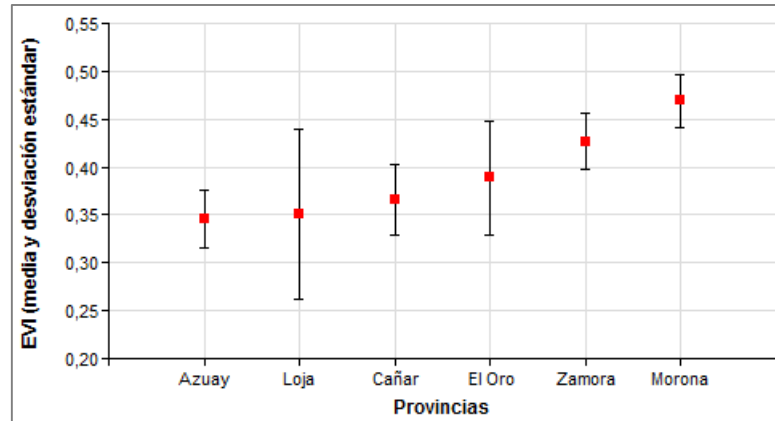


Figura 8. Valores de media y desviación estándar del EVI obtenidos en las provincias evaluadas, para el periodo 2000 – 2014

En la Figura 9 se puede observar la tendencia de la serie temporal de EVI con datos medios mensuales, donde se observa que 12 ecosistemas presentan una tendencia a la disminución en los valores del índice de vegetación entre los años 2000 y 2014. El ecosistema que presenta una tendencia negativa más acusada es AsSn01 (en el 75.0% de su área) y el ecosistema con menor tendencia negativa es BmPn01 (en el 4% de su superficie).

Con respecto a tendencias positivas del índice EVI, solo en 3 ecosistemas existe este caso, que corresponden a BmPn01, AmMn01 y BmBn01. Sin embargo, este aumento sólo es significativo en el 0.9, 2.4, y 0.6% de su área respectivamente. Estos ecosistemas se concentran en su mayoría en la provincia de Loja y una pequeña parte en el sur de la provincia de Azuay.

Con respecto a las zonas de deforestación, éstas registraron una significativa tendencia negativa en el 43.5 % de su superficie.

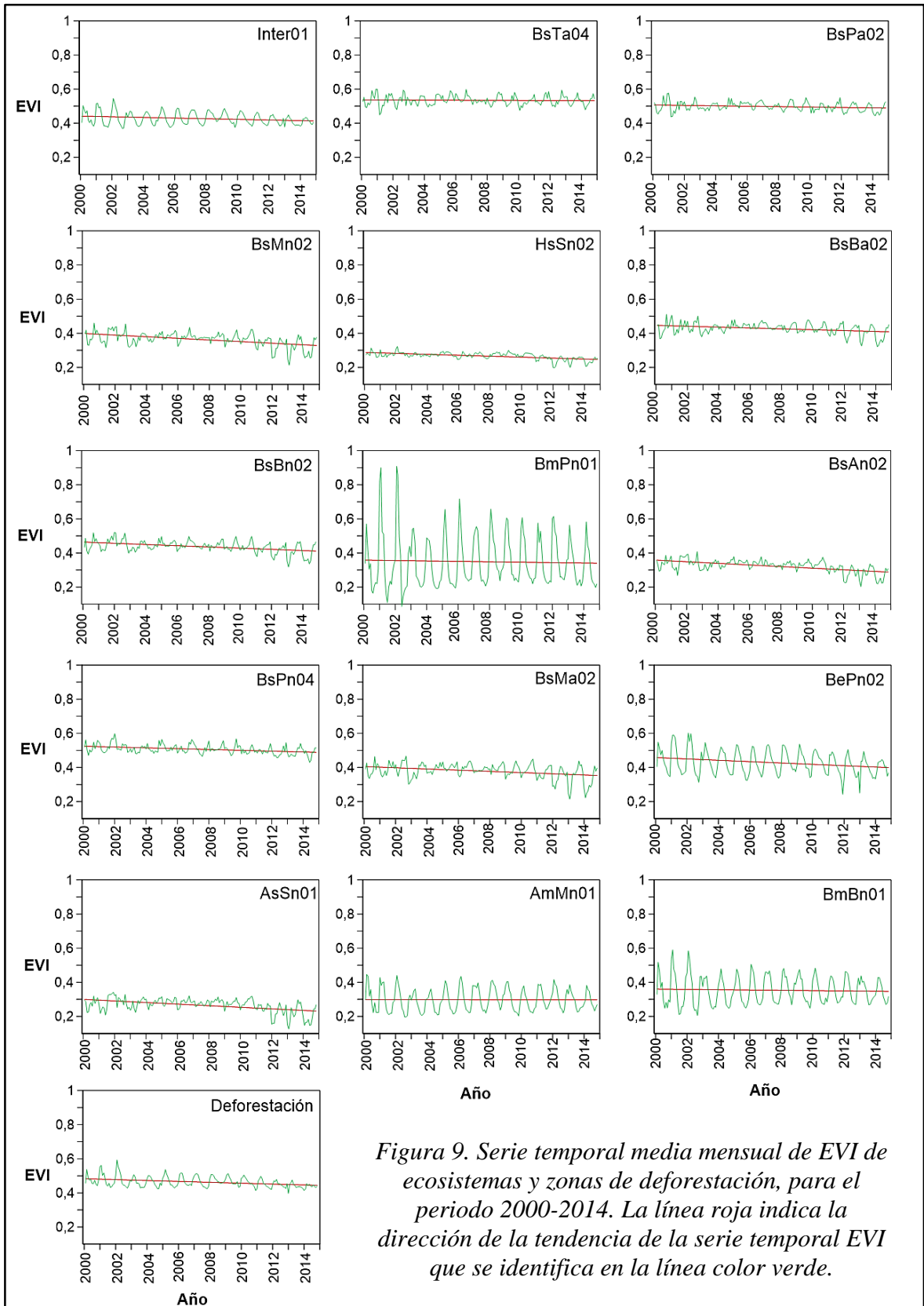


Figura 9. Serie temporal media mensual de EVI de ecosistemas y zonas de deforestación, para el periodo 2000-2014. La línea roja indica la dirección de la tendencia de la serie temporal EVI que se identifica en la línea color verde.

En relación a las provincias, en la Figura 10 se pueden observar que todas presentaron una tendencia negativa del índice EVI. La provincia de Zamora Chinchipe presentó la mayor tendencia negativa que fue significativa en el 50.4 % de su territorio. Por el contrario, Loja presentó la menor tendencia negativa significativa registrada tan sólo en el 11.9 % de su superficie. Resultados similares fueron obtenidos para esta provincia por (Ruiz y Reyes 2014) al constatar una reducción de la actividad fotosintética en el 13.6 % de su superficie con una significancia estadística ≤ 0.1 .

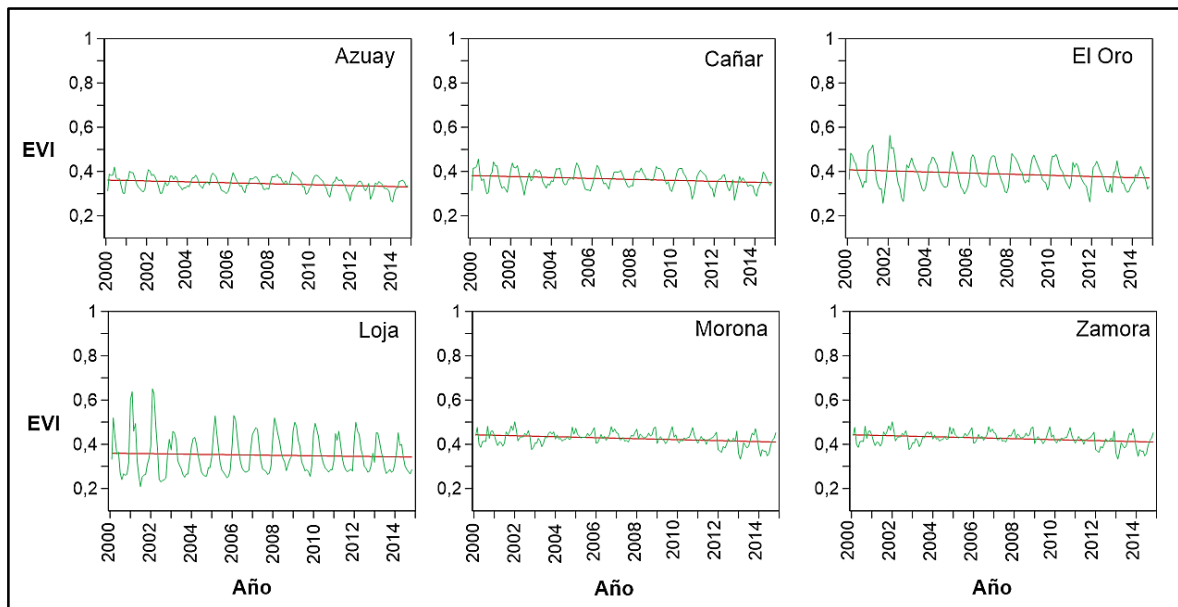


Figura 10. Serie temporal media mensual de EVI calculado para las provincias evaluadas, para el periodo 2000-2014. La línea roja indica la dirección de la tendencia de la serie temporal EVI que se identifica en la línea color verde.

Todos estos resultados representados a partir del análisis de los datos medios mensuales, también se confirmaron con datos interanuales, los cuales se pueden observar en la Figura 11. Se puede observar en la línea de tiempo que la mayoría de ecosistemas y provincias o bien mantienen o experimentan una leve reducción en sus valores de EVI, sin embargo, en el año 2010 existe un descenso más acusado, especialmente en los ecosistemas BePn02, BsMa02, BsMn02, BsAn02, AsSn01, ubicados en las estribaciones orientales y occidentales de la Cordillera de los Andes en las provincias de El Oro, Loja, Zamora Chinchipe y Morona Santiago.

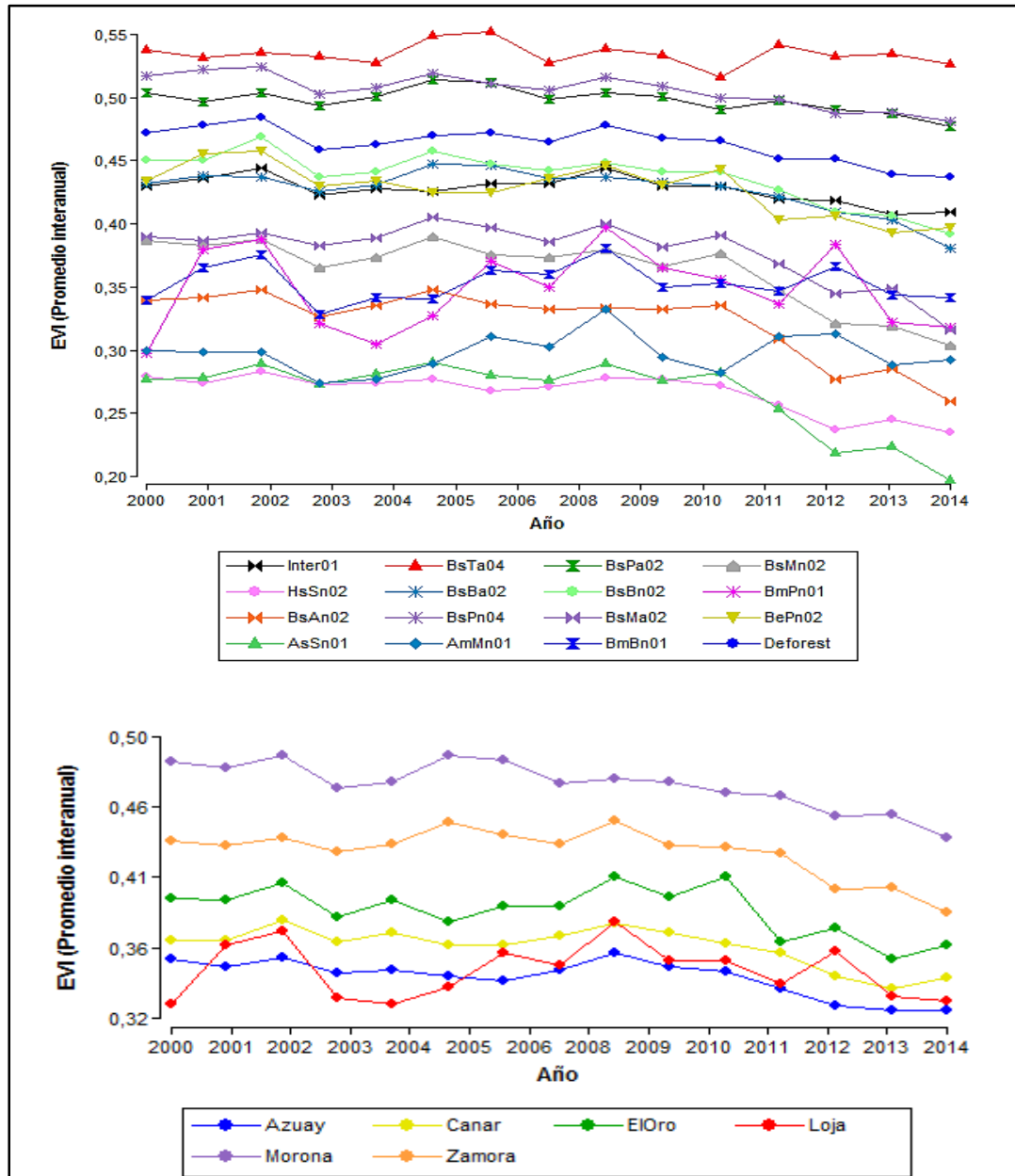


Figura 11. Serie temporal interanual de EVI de los ecosistemas, zonas de deforestación y provincias, para el periodo 2000 – 2014

Este fuerte descenso se puede asociar a la presencia del evento del fenómeno de “La Niña” ocurrido durante los años 2010 y 2011(Figura 12), donde los valores normalizados negativos del Índice Multivariado ENSO (MEI en inglés) son evidentes durante los años mencionados, afectando posiblemente a la productividad y la fenología de la cobertura vegetal de los ecosistemas (van Leeuwen et al. 2013, Hilker et al. 2014). El MEI es el índice más completo y utilizado para caracterizar la intensidad de El Niño

Oscilación Sur (ENOS, ENSO en inglés), ya que combina seis variables meteorológicas y oceanográficas como la presión al nivel del mar (P), componentes zonales (U) y meridionales (V) del viento en la superficie, temperatura superficial del mar (S), temperatura superficial del aire (A) y la fracción total de la nubosidad del cielo (C) (Wolter and Timlin 1998).

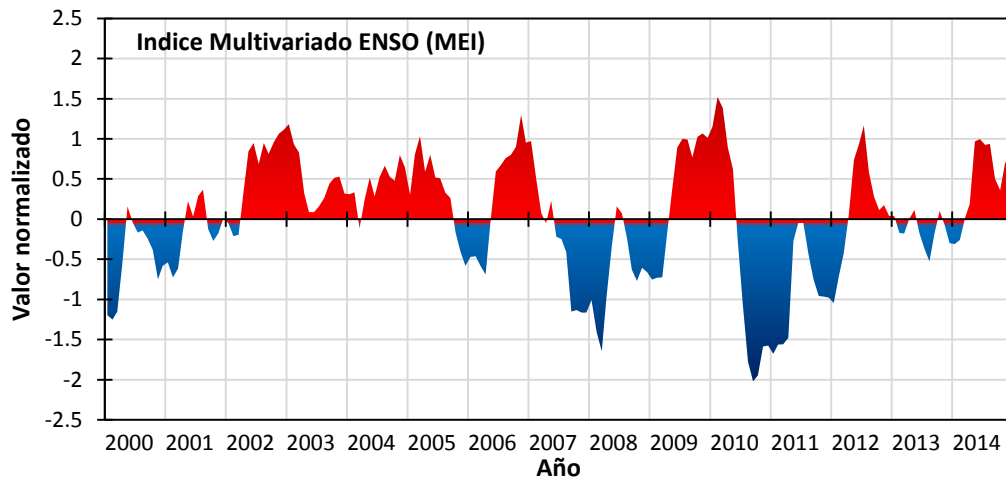


Figura 12. Serie temporal del Índice Multivariado ENSO, para el periodo 2000 – 2014. Los valores negativos en azul representan la fase fría del ENSO (La Niña), los valores positivos en rojo representan la fase cálida del ENSO (El Niño).

La marcada disminución de EVI en los dos años se puede evidenciar con las anomalías negativas de precipitación presentadas en la época lluviosa del periodo enero - mayo de 2010, tal como se lo puede ver en la Figura 13, donde las provincias evaluadas presentaron anomalías negativas entre -1 a -23 % de variación con respecto a su normal climatológica acumulada (enero – mayo) de 1981 – 2010 (Palacios et al. 2014).

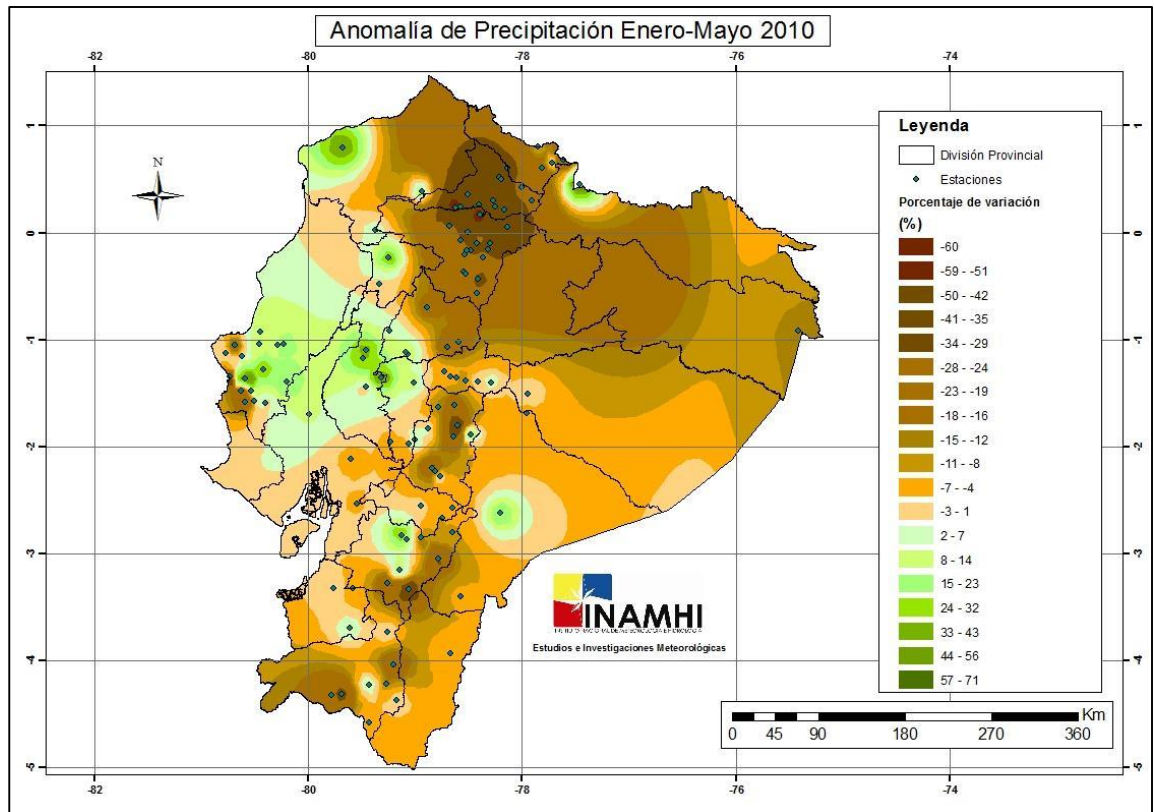


Figura 13. Anomalías de precipitación en el periodo lluvioso enero – mayo, para el año 2010. Las áreas con tonos cafés representan una anomalía negativa en la precipitación, mientras que los tonos verdes una anomalía positiva (Palacios et al. 2014).

En la Figura 14 se puede apreciar el comportamiento estacional del EVI en el periodo de un año a nivel de ecosistemas y provincias. A nivel de ecosistemas se identifican dos patrones temporales diferentes de EVI. El primer patrón lo constituyen los ecosistemas AmMn01, BmBn01, BmPn01, BePn02, las zonas intervenidas y zonas de deforestación, iniciando su mayor actividad fotosintética en el mes de enero y terminando en junio, mientras que la menor actividad se desarrolla a partir del mes de julio hasta el mes de diciembre. Destaca el elevado contraste fenológico del ecosistema BmPn01. Los ecosistemas restantes constituyen el segundo patrón en el que la mayor actividad fotosintética se desarrolla entre agosto y diciembre, y la menor actividad se desarrolla de enero a julio.

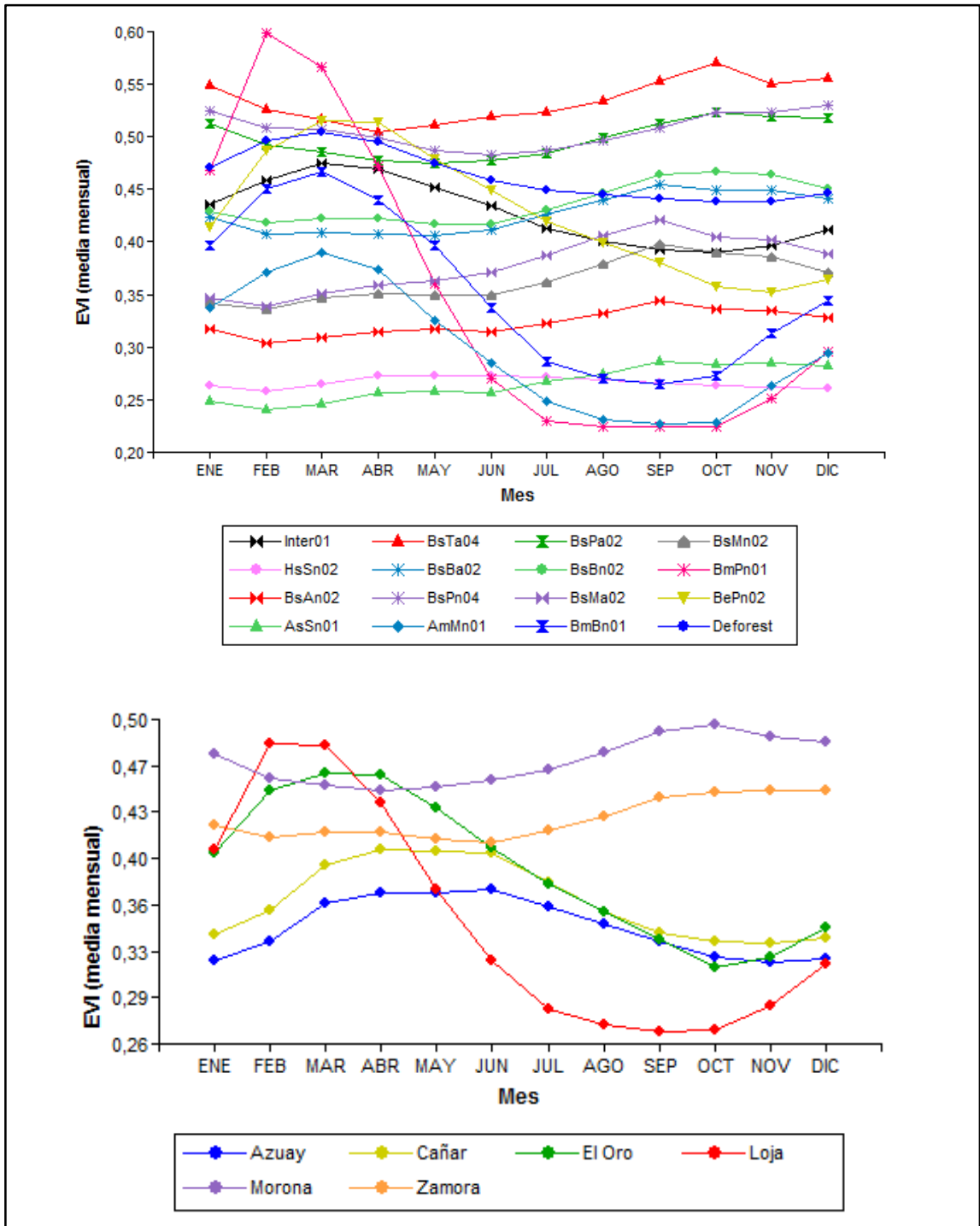


Figura 14. Serie estacional de EVI de los ecosistemas, zonas de deforestación y provincias para el período enero – diciembre. Construido en base a datos desde el año 2000 al 2014.

A nivel de provincias se aprecian tres patrones temporales, el primero lo constituye Loja y El Oro con la máxima actividad fotosintética para el periodo enero a junio y la menor actividad de julio a diciembre. Este patrón está influenciado por la presencia dominante de las zonas intervenidas (48.3%, de la superficie total de las dos provincias), BmPn01 (9.6%), zonas deforestadas (8.5%), BePn02 (5.8%), AmMn01 (4.2%) y BmBn01 (3.9%), que tienen el mismo comportamiento fotosintético estacional durante el año. En el segundo patrón están Cañar y Azuay donde la máxima actividad se alcanza entre febrero y julio y la actividad baja entre agosto y enero. Estas provincias están influenciadas por su predominancia geográfica y comportamiento fotosintético de las zonas intervenidas (47.4%, superficie total de las dos provincias), HsSn02 (23.0%), BsAn02 (3.6%) y zonas deforestadas (3.6%). El tercer patrón lo conforma Morona Santiago y Zamora Chinchipe donde la máxima actividad del EVI se presenta en el periodo agosto a enero y la actividad baja desde el mes de febrero hasta julio, el patrón de EVI de estas provincias está influenciado por la actividad fotosintética de zonas intervenidas (18.4%, de la superficie total de las dos provincias), BsTa04 (16.6%), BsPa02 (15.1%), BsMn02 (9.8%), BsBa02 (7.4%) y BsBn02 (6.1%).

3.3 Análisis de la tendencia temporal del EVI

El análisis de magnitud de cambio de EVI mediante el estimador de la pendiente Theil-Sen generó una imagen (Figura 15) con la media del cambio del EVI durante el periodo de estudio para cada píxel de la zona de estudio. Píxeles con valores positivos hasta un máximo de 25.9677 indican un incremento en el verdor de la vegetación; píxeles con valores negativos hasta un mínimo de -24.3092 indican una disminución en el verdor de la vegetación, mientras que las zonas con valores cercanos a 0 indican una magnitud menos pronunciada de cambio.

Las magnitudes de cambio negativas se concentraron especialmente en las estribaciones occidentales de la Cordillera de los Andes de las provincias de Azuay y El Oro, así mismo se identificó un segundo patrón negativo en las estribaciones orientales de los Andes en la provincia de Morona Santiago.

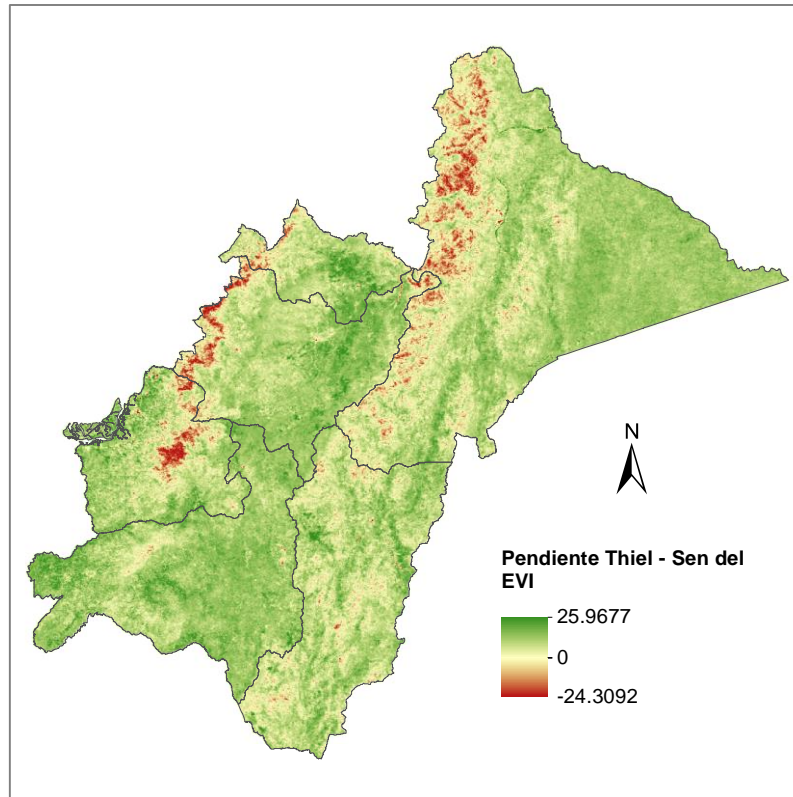


Figura 15. Magnitud de la pendiente del estimador Theil-Sen de la zona de estudio.

Los cambios negativos y positivos de EVI fueron evaluados según su significancia a través del test de tendencia CMK, el cual genera entre sus productos una imagen con la significancia estadística de cada pixel e incorpora también información contextual de sus píxeles vecinos. En la Figura 16, se puede observar que las zonas color rojo tienen una significancia $p < 0.05$, por el contrario zonas de color amarillo, verde y azul no son estadísticamente significantes pues su p valor es mayor a 0.05.

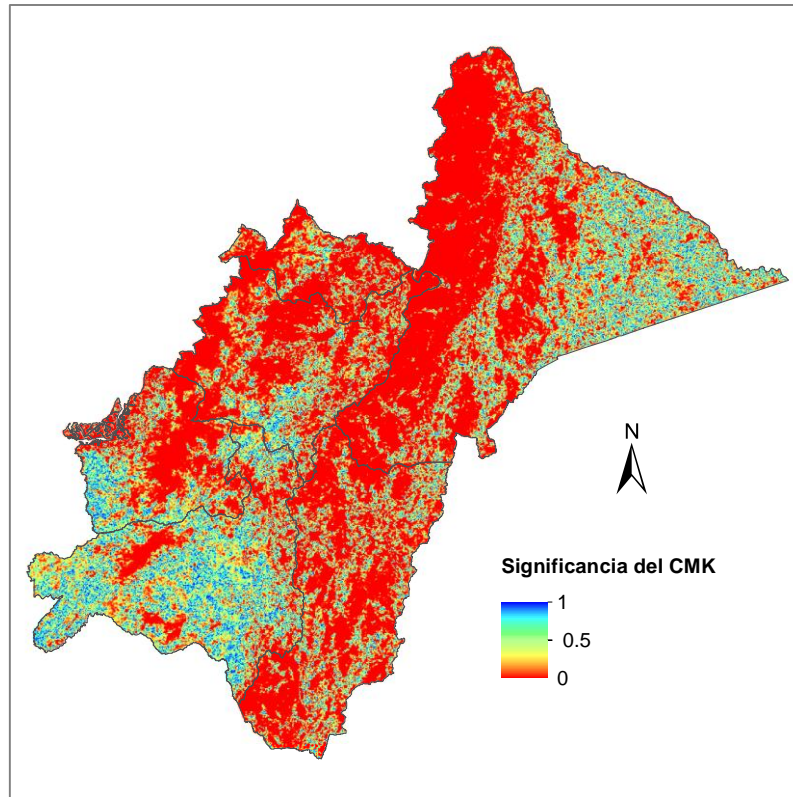


Figura 16. Significancia de las tendencias negativas y positivas de EVI a través del test CMK.

La imagen CMK de significancia fue reclasificada en una nueva, dejando solo píxeles con $p < 0.05$ y luego intersectándola con la imagen del estimador Thiel-Sen anterior para identificar las zonas con cambios negativos positivos-negativos estadísticamente significativos (Figura 17).

A través de las pruebas Theil-Sen y CMK se pudo identificar que en las dos zonas de planificación, el 69.7 % de su superficie presenta una tendencia negativa en el EVI, mientras que en el 30.3 % de la superficie restante existe una tendencia positiva o incremento de la actividad fotosintética. Sin embargo estadísticamente estos cambios solo son significativos con un $p < 0.05$ con tendencias negativas en el 38.9 % de la superficie y tendencias positivas en el 7.2 %. (Figura 14)

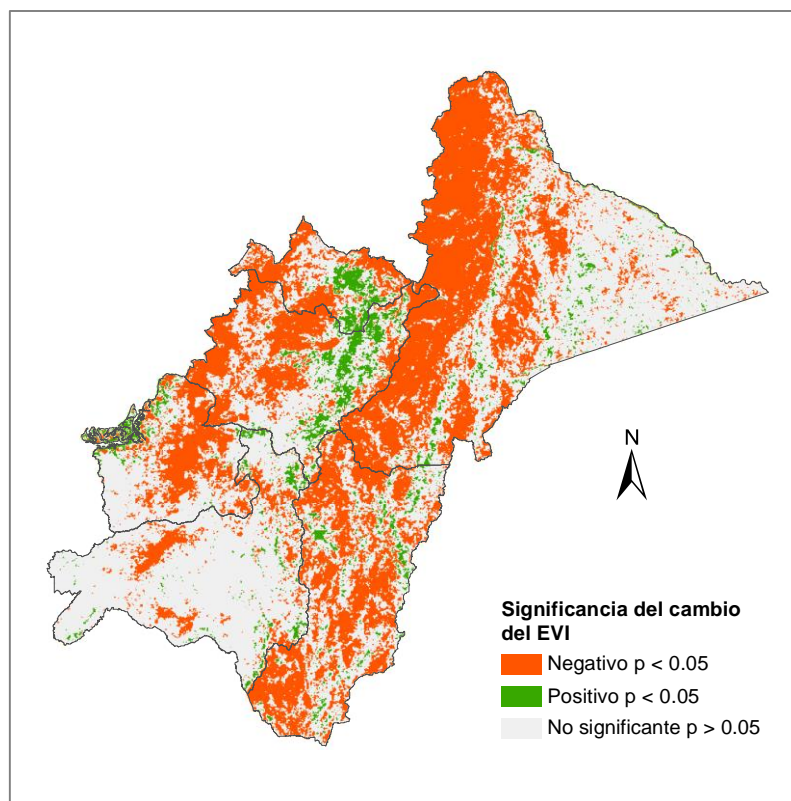


Figura 17. Áreas con cambios negativos y positivos de EVI estadísticamente significativos

La Tabla 3 y Figuras 18 muestran los resultados obtenidos tras aplicar los test MCK y TS a la serie temporal de imágenes MODIS-EVI. Se puede evidenciar que, durante el periodo de estudio, siete ecosistemas presentaron un cambio negativo estadísticamente significativo ($p < 0.05$) de los valores de EVI mayor al 50 % de su superficie. El ecosistema con mayor cambio negativo de EVI fue *Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo* (AsSn01) que presentó cambios negativos en el 75 % de su superficie, mientras que el ecosistema *Bosque semidecíduo piemontano del Catamayo-Alamor* (BmPn01) tuvo el menor cambio negativo (sólo en 4% de su superficie). Referente a los cambios positivos, el mayor cambio fue registrado para el ecosistema *Intervención* en un 8.2 % de su superficie, mientras que el ecosistema *Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor* (BePn02) presentó el menor cambio positivo en el 0.1 % de su área.

En zona de *Deforestación* se registraron cambios negativos en el 43.5 % de su superficie y cambios positivos la en el 3.3 % durante el periodo de evaluación.

A nivel de provincias, Zamora Chinchipe registro el mayor cambio negativo en un 50.4 % de su superficie y Loja el menor cambio en un 11.9 %. Con respecto a cambios positivos del EVI, Cañar registró el mayor cambio en un 15 % de su área.

Tabla 3. Resultados MKC y TS de las tendencias del EVI en los ecosistemas, deforestación y provincias evaluados.

ZONA	TS magnitud	TS tendencia		CMK significancia			
		Tendencia negativa (%)	Tendencia positiva (%)	Tendencia negativa (%)	Tendencia positiva (%)	Tendencia negativa (ha)	Tendencia negativa (ha)
				p < 0.05		p < 0.05	
ECOSISTEMAS							
Inter01	-0.024	67.2	32.7	35.3	8.2	702160	164108
BsTa04	-0.004	56.6	43.3	9.0	3.5	51697	20162
BsPa02	-0.019	69.4	30.5	35.3	6.3	184556	32862
BsMn02	-0.072	88.3	11.6	71.4	2.7	284156	10776
HsSn02	-0.039	83.2	16.5	65.5	4.7	251804	18259
BsBa02	-0.039	79.8	20.1	49.8	2.7	127099	6916
BsBn02	-0.053	85.2	14.8	64.1	2.6	134869	5495
BmPn01	0.005	45.8	54.1	4.0	0.9	6495	1426
BsAn02	-0.072	84.3	15.7	68.4	3.6	79904	4216
BsPn04	-0.037	81.8	18.1	56.5	2.1	61844	2350
BsMa02	-0.053	86.0	13.8	59.5	1.1	59754	1145
BePn02	-0.051	81.7	18.3	44.9	0.1	43650	72
AsSn01	-0.068	91.2	8.8	75.0	1.7	67457	1549
AmMn01	0.005	40.5	59.5	4.4	2.4	3567	1971
BmBn01	0.001	45.5	54.5	5.6	0.6	3667	405
DEFORESTACIÓN	-0.036	76.6	23.3	43.5	3.3	178996	13377
PROVINCIAS	0.000						
Azuay	-0.028	68.2	31.7	41.9	11.1	349082	92362
Cañar	-0.027	70.5	29.1	44.6	15.0	140252	47069
El Oro	-0.036	72.4	27.1	36.8	6.2	211378	35540
Loja	-0.003	51.8	48.1	11.9	3.6	132012	39582
Morona	-0.041	77.3	22.6	47.9	2.7	1151774	64242
Zamora	-0.034	78.2	21.6	50.4	4.6	532851	48172

En cuanto a la magnitud del cambio calculado con el estimador Thiel-Sen, se identificaron seis ecosistemas con valores negativos promedios de sus píxeles mayores a -0.05 de EVI, los ecosistemas BsMn02 y BsAn02 registraron el mayor cambio negativo de EVI con un valor de -0.072, sin embargo, los ecosistemas BmPn01, AmMn01 y BmBn01 registraron un valor promedio positivo de sus píxeles.

La zona correspondiente a deforestación redujo, en promedio de todos sus píxeles, un -0.036 de EVI. En cuanto a los resultados identificados en las provincias, Morona

Santiago registro el mayor cambio negativo con -0.041 de EVI y la provincia de Loja obtuvo el menor cambio negativo de actividad fotosintética con -0.003.

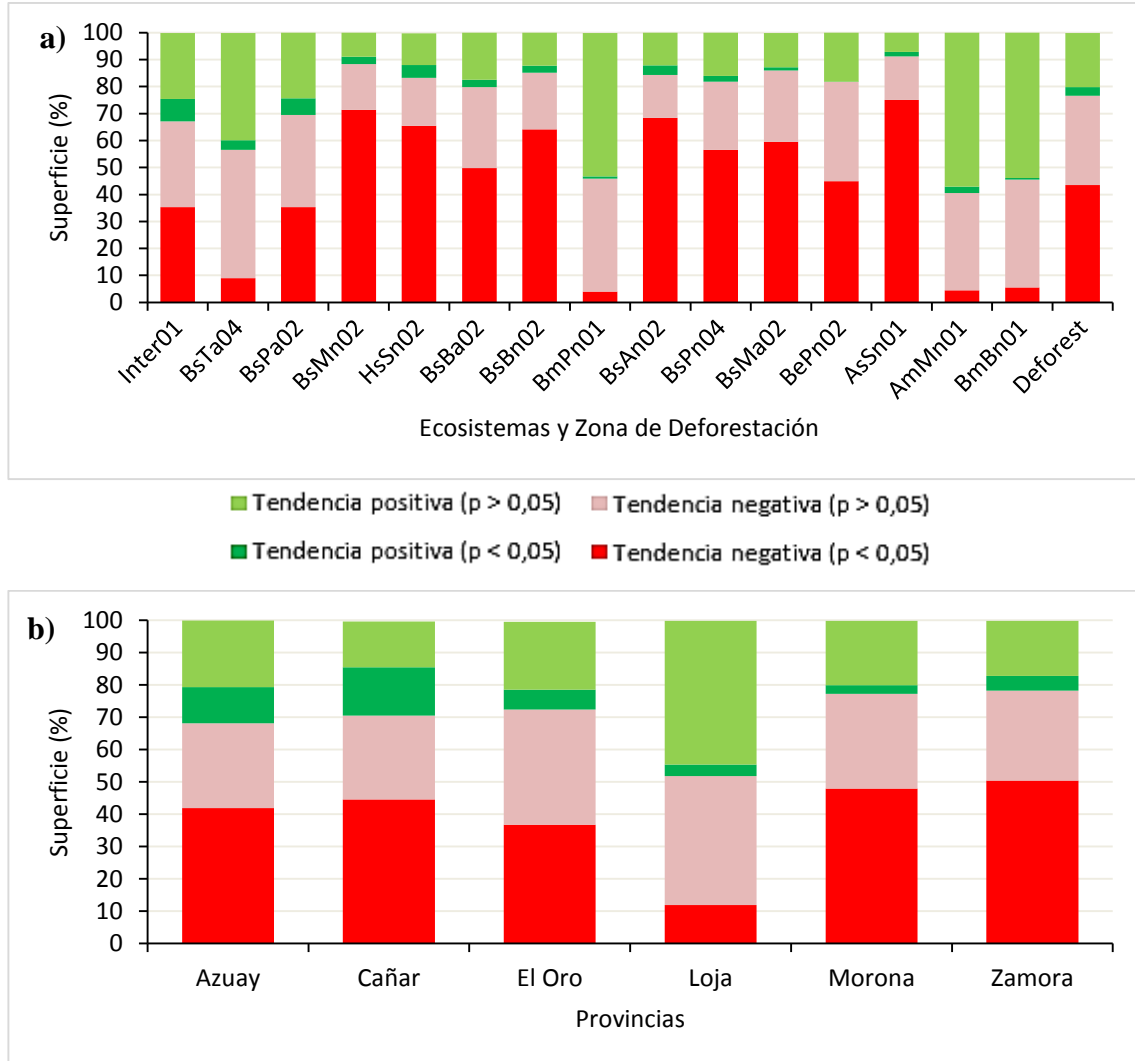


Figura 18. Porcentaje de superficie acumulada de tendencias negativas y positivas, significativas y no significativas a) en los ecosistemas y zonas deforestadas, b) en las provincias evaluadas.

3.4 Correlación de datos EVI con precipitación y temperatura.

La precipitación y la temperatura en la zona de estudio tiene comportamientos muy marcados entre las diferentes estaciones. Esto se debe a variables particulares como la topografía irregular de las depresiones de Girón-Cuenca y Huancabamba, gradientes altitudinales fuertes desde los 0 a los 5290 msnm (Volcán Sangay), vientos del pacifico y la amazonia, entre otros (Richter y Moreira-Muñoz 2005, Emck et al. 2006, Emck 2007, Espinoza Villar et al. 2009).

En la Figura 19 se presentan tres estaciones con datos interanuales de precipitación, que tuvieron un incremento anual significativo ($p < 0.05$), como la estación M0143 (Malacatos) con 20.94 mm, M0419 (Giron) con 36.79 mm y M0438 (Jimbura) con 58.55 mm.

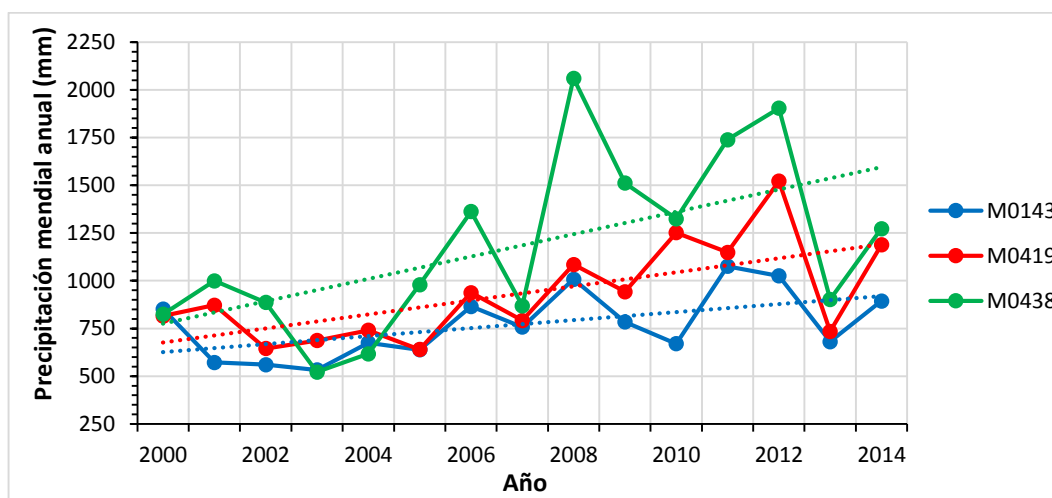


Figura 19. Estaciones con aumento significativo de precipitación, en el periodo 2000-2014

En relación a los datos de temperatura, cuatro estaciones presentaron un incremento anual significativo durante el periodo de evaluación (Figura 20), como la M0033 (Loja) con 0.03 °C, M0146 (Cariamanga) y M0148 (Celica) con 0.04 °C y M1095 (Ingenio Aztra) con 0.06 °C.

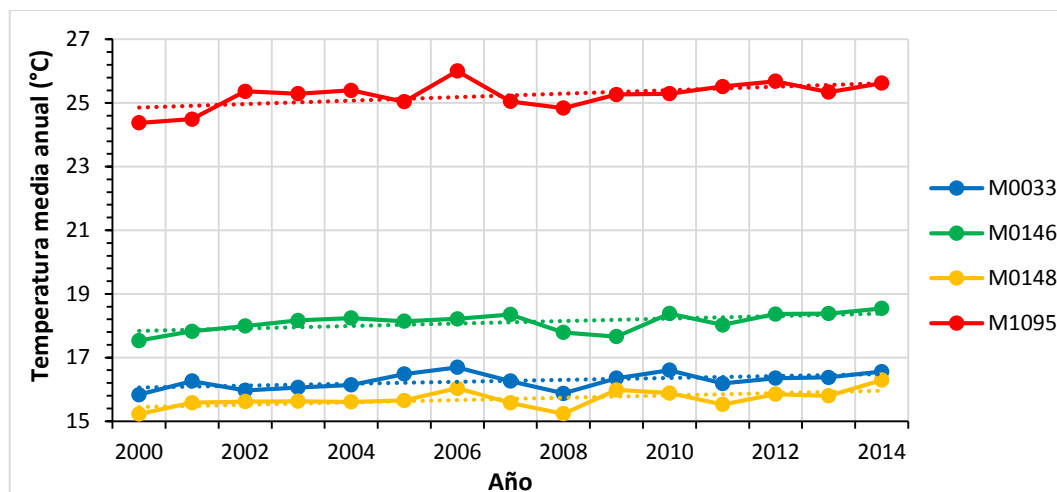


Figura 20. Estaciones con aumento significativo de temperatura, en el periodo 2000-2014

La Tabla 4 muestra los coeficientes de correlación y significancia del ajuste entre los datos de precipitación media mensual y los valores de EVI para las áreas de influencia de las 41 estaciones analizadas.

Tabla 4. Coeficientes de correlación y significancia entre los valores de EVI y la precipitación media mensual de las 41 estaciones analizadas. La significancia esta expresada por: (*) $p < 0.05$, (**) $p > 0.05$

Estación	Pearson	Estación	Pearson	Estación	Pearson
M0031*	0.45	M0410**	-0.08	M0433*	0.56
M0033*	0.24	M0411*	0.38	M0434*	0.62
M0138*	0.29	M0412**	0.08	M0435*	0.54
M0142*	0.25	M0414*	0.18	M0437*	0.64
M0143*	0.65	M0417*	-0.21	M0438*	0.55
M0145*	0.61	M0418*	0.18	M0439*	0.58
M0146*	0.57	M0419*	0.41	M0481*	0.18
M0147*	0.35	M0422*	0.42	M0497**	0.04
M0148*	0.5	M0424*	0.4	M0501*	-0.17
M0149*	0.51	M0426*	0.33	M0503*	-0.3
M0150*	0.5	M0427*	0.3	M0506**	-0.08
M0189*	-0.26	M0429*	-0.21	M0544*	0.39
M0197*	0.31	M0431*	0.17	M1095*	0.5
M0217*	-0.31	M0432*	0.17		

En el análisis de la variable de precipitación de las 41 estaciones evaluadas, 13 presentaron un coeficiente de correlación positivo $R = > 0.5$ con un nivel de significancia

$p < 0.05$, igualmente ocho estaciones presentaron correlaciones negativas, pero ninguna de ellas mayores a -0.5 , demostrando que el EVI tiene una respuesta directa con los regímenes de precipitación en el 31% de las estaciones evaluadas. Los valores de correlación de Pearson variaron desde $R = -0.31$ en la estación M0217 (Peñas Coloradas) hasta $R = 0.65$ en la estación de M0143 (Malacatos), ambos con un $p = 0.0001$, evidenciando que puede darse el caso que, aunque no exista una fuerte correlación negativa, pero si una significancia alta, a mayores precipitaciones los valores de EVI pueden disminuir, esto puede deberse a la capacidad de soportar un estrés hídrico de altas precipitaciones de ciertas coberturas vegetales y/o ecosistemas.

Con respecto a la temperatura (Tabla 5) tres estaciones mostraron coeficientes de correlación positivos y nueve negativos. Sin embargo, solo la estación M1095 (Ingenio Aztra) mostró una correlación positiva $R = > 0.5$ y $p = 0.0001$, por el contrario, la estación M0145 (Quinara) ofreció la mayor correlación negativa $R = -0.4$ y $p = 0.0001$, lo cual nos indica que la temperatura nos es una variable climática significativamente relacionada con el aumento o disminución de los valores de EVI en las zonas evaluadas.

Tabla 5. Coeficientes de correlación y significancia entre los valores de EVI y la temperatura media mensual de las 15 estaciones analizadas. La significancia esta expresada por: () $p < 0.05$, (**) $p > 0.05$*

Estación	Pearson	Estación	Pearson
M0031*	-0.15	M0146**	-0.07
M0033**	-0.13	M0148**	-0.13
M0138**	-0.12	M0150*	-0.39
M0142**	0.07	M0189*	0.45
M0143**	-0.12	M1095*	0.57
M0145*	-0.4		

En la Figura 21 se presenta la distribución espacial de las estaciones en función de los resultados de correlación de Pearson y significancia estadística, obtenida entre los datos de precipitación y temperatura con los datos EVI.

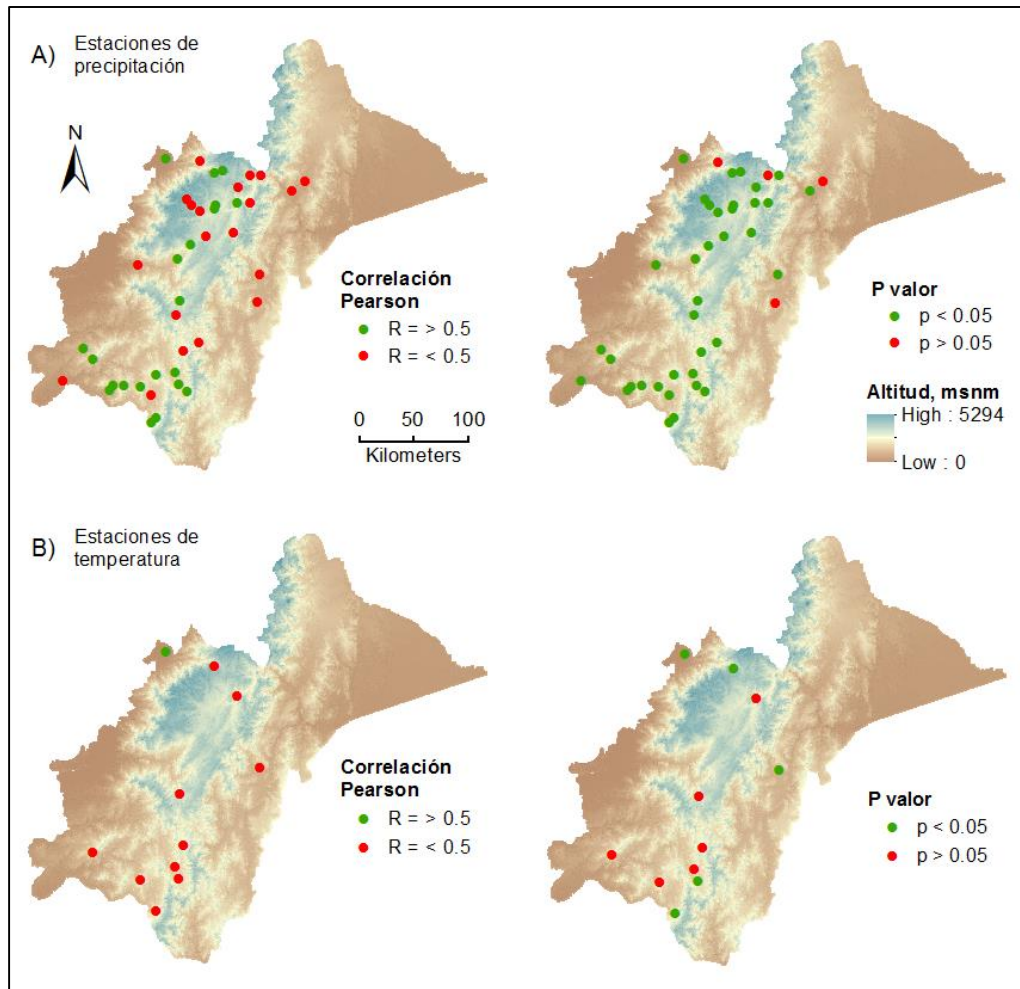


Figura 21. Distribución espacial de los resultados de correlación y significancia de los datos de precipitación y temperatura con los datos de EVI: A) Estaciones de precipitación B) Estaciones de temperatura.

Se puede observar que existe un patrón de estaciones de precipitación altamente correlacionada y estadísticamente significativos dentro de la cordillera de los Andes, lo cual no sucede en las zonas bajas de la Costa y la Amazonia. Con respecto a las estaciones de temperatura solo una estación mostró una alta correlación, aunque si observamos la significancia tampoco encontramos un patrón espacial definido.

4 CONCLUSIONES

- La actividad fotosintética en los ecosistemas evaluados es muy variable a lo largo del año, identificándose dos patrones temporales con mayor actividad fotosintética enero-junio y agosto-diciembre.
- La dinámica del EVI a nivel de provincias no es similar debido a los distintos ecosistemas que predominan en cada uno de ellos lo que se traduce en tres patrones temporales relacionados con su mayor actividad fotosintética Loja y el Oro (enero – junio), Cañar y Azuay (febrero – julio), Morona Santiago y Zamora Chinchipe (agosto – enero).
- De forma general todos los ecosistemas presentaron una disminución significativa del EVI en la serie temporal analizada. Esta disminución está comprendida entre el 4 % y el 75 % de su superficie respectiva, siendo el ecosistema Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (AsSn01) ubicado en las partes altas de la cordillera de los Andes el que presentó el mayor índice negativo. Esta misma disminución se vio reflejada a nivel de las zonas de deforestación en el 43.5 % de su territorio, así como en todas las provincias evaluadas con tasas de disminución significativa entre el 11 % (Loja) y el 50.4 % (Zamora Chinchipe) de su superficie.
- Se deben realizar estudios puntuales y exhaustivos en los ecosistemas donde se identificó la mayor disminución del EVI a nivel de series temporales incluyendo variables climáticas, cambio de uso del suelo, datos de más sensores remotos, entre otros y conocer la vulnerabilidad que enfrentan los ecosistemas ante el cambio climático.
- Los picos altos y bajos de EVI de la serie temporal analizada, tienen un comportamiento muy similar a la serie temporal de los datos ENSO, esto nos sugiere que los fenómenos de El Niño y La Niña ejercen un fuerte impacto en los datos EVI de los ecosistemas, y que debería ser estudiado de forma exhaustiva su correlación.
- El problema de la nubosidad fue persistente principalmente en los flancos occidental y oriental de la Cordillera de los Andes, con una ocurrencia de píxeles inválidos entre el 80 y el 100 %, por lo cual se debería profundizar el estudio de series temporales en zonas de alta nubosidad.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaraz-Segura, D., y G. Baldi. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Revista* 17:108–117.
- Bendix, J., E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu, y W. Wilcke. 2013. Ecosystem Services, Biodiversity and environmental change in a tropical mountain ecosystem of South Ecuador. (J. Bendix, E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu, and W. Wilcke, Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bohn, Y., C. Fornerón, y M. Piccolo. 2012. Analisis de cubiertas vegetales en ambientes naturales del Sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina).
- Brando, P. M., S. J. Goetz, A. Baccini, D. C. Nepstad, P. S. a Beck, y M. C. Christman. 2010. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107:14685–90.
- Bravo-Peña, L. C., A. Castellanos-Villegas, L. C. Alatorre-Cejudo, y M. E. Torres-Olave. 2013. Tendencias temporales del Índice Mejorado de la Vegetación (EVI) en cinco coberturas naturales del occidente, norte y noroeste de México durante el periodo 2000-2013. langif.uaslp.mx.
- Caballera Lopez, I. J. 2013. Nota técnica N° 13 de AEMET. Análisis de la homogeneidad de las series de precipitación de Guipúzcoa.
- Chuvieco, E. 2008a. *Earth observation of global change*. Springer.
- Chuvieco, E. 2008b. *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Entorno Geografico. Editorial Ariel.
- Colditz, R. R., C. Conrad, T. Wehrmann, M. Schmidt, y S. Dech. 2008. TiSeG: A flexible software tool for time-series generation of MODIS data utilizing the quality assessment science data set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46:3296–3308.
- Córdoba, S., J. a. Zea, y W. Murillo. 2006. Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del río Queto en el departamento del Chocó, Colombia. *Meteorología Colombiana*:100–110.

- Czerwinski, C. J., D. J. King, y S. W. Mitchell. 2014. Mapping forest growth and decline in a temperate mixed forest using temporal trend analysis of Landsat imagery, 1987–2010. *Remote Sensing of Environment* 141:188–200.
- Eastman, R. 2012. *IDRISI Selva guía para SIG y procesamiento de imágenes*:321.
- Echeverry, M. A., y G. J. Harper. 2009. Fragmentación y deforestación como indicadores del estado de los ecosistemas en el Corredor de Conservación Choco-Manabí (Colombia-Ecuador). *Recursos Naturales y Ambiente*:78–88.
- Emck, P. 2007. *A Climatology of South Ecuador-with special focus on the Major Andean Ridge as Atlantic-Pacific Climate Divide*.
- Emck, P., A. Moreira-muñoz, y M. Richter. 2006. El clima y sus efectos en la vegetación. *Botánica Económica de los Andes Centrales*.
- Erasmí, S., A. Schucknecht, M. P. Barbosa, and J. Matschullat. 2014. Vegetation greenness in northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. *Remote Sensing* 6:3041–3058.
- Espinoza Villar, J. C., J. Ronchail, J. L. Guyot, G. Cochonneau, F. Naziano, W. Lavado, E. De Oliveira, R. Pombosa, y P. Vauchel. 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29:1574–1594.
- Galeas, C., Z. Aguirre, G. Navarro, y W. Ferreira. 2010. Propuesta metodológica para la representación cartográfica de los ecosistemas del Ecuador continental.
- García-Mora, T. J., y J. F. Mas. 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
- García-Mora, T. J., J.-F. Mas, y E. a. Hinkley. 2012. Land cover mapping applications with MODIS: a literature review. *International Journal of Digital Earth* 5:63–87.
- Giner, C., B. Martínez, M. Gilabert, y D. Alcaraz-Segura. 2009. Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009). *Revista de Teledetección*:51–64.
- Govender, M., K. Chetty, y H. Bulcock. 2007. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA* 33:145–151.
- He, Y., X. Guo, y J. Wilmshurst. 2014. Studying mixed grassland ecosystems I: suitable hyperspectral vegetation indices. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32:98 – 107.

- Herzog, S. K., R. Martínez, P. M. Jørgensen, y H. Tiessen. 2011. Climate change and biodiversity in the tropical Andes. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- Hilker, T., A. I. Lyapustin, C. J. Tucker, F. G. Hall, R. B. Myneni, Y. Wang, J. Bi, Y. Mendes de Moura, y P. J. Sellers. 2014. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111:16041–16046.
- Huete, a., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, y L. G. Ferreira. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195–213.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos - INEC. 2010. Resultados del Censo 2010 de población y vivienda del Ecuador.
- Javzandulam, T., R. Tateishi, y T. Sanjaa. 2005. Analysis of vegetation indices for monitoring vegetation degradation in semi-arid and arid areas of Mongolia. *International Journal of Environmental Studies* 62:215–225.
- Jiang, Z., A. Huete, K. Didan, y T. Miura. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112:3833–3845.
- Jinguo, Y., y W. Wei. 2004. Identification of forest vegetation using Vegetation Indices. *Chinese Journal of Population Resources and Environment* 2:12–16.
- Justice, C. ., J. R. . Townshend, E. . Vermote, E. Masuoka, R. . Wolfe, N. Saleous, D. . Roy, y J. . Morisette. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment* 83:3–15.
- De la Torre, L., C. E. Cerón, H. Balslev, y F. Borchsenius. 2012. A biodiversity informatics approach to ethnobotany: meta-analysis of plant use patterns in Ecuador. *Ecology and Society* 17:art15.
- Van Leeuwen, W., K. Hartfield, M. Miranda, y F. Meza. 2013. Trends and ENSO/AAO driven variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing* 5:1177–1203.
- Lessmann, J., J. Muñoz, y E. Bonaccorso. 2014. Maximizing species conservation in continental Ecuador: a case of systematic conservation planning for biodiverse regions. *Ecology and Evolution* 4:2410–2422.

- Lunetta, R. S., J. F. Knight, J. Ediriwickrema, J. G. Lyon, y L. D. Worthy. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 105:142–154.
- MAE. 2013. Ministerio del Ambiente del Ecuador: Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaria de Patrimonio Natural. Quito.
- Matsushita, B., W. Yang, J. Chen, Y. Onda, y G. Qiu. 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Sensors* 7:2636–2651.
- Myneni, R. 2012. MODIS LAI / FPAR Product User ' s Guide.
- Neeti, N., y J. R. Eastman. 2011. A Contextual Mann-Kendall Approach for the assessment of trend significance in image time series. *Transactions in GIS* 15:599–611.
- Padron, E., y R. Navarro-Cerrillo. 2007. Aboveground biomass in *Prosopis pallida* (Humb and Bonpl Ex Willd) HBK ecosystems using Landsat 7 ETM+ images. *Revista Chilena de Historia Natural*, ...:43–53.
- Palacios, J., F. Rivero, y D. Rosero. 2014. Anomalías de precipitación en el Ecuador continental e insular durante los años 2007 al 2014. Quito.
- Ponman, B. E., y R. W. Bussmann. 2012. Medicinal plants and the legacy of Richard E . Schultes.
- Richter, M., y A. Moreira-Muñoz. 2005. Heterogeneidad climática y diversidad de la vegetación en el sur de Ecuador: un método de fitoindicación. *Revista Peruana de Biología* 12:217–238.
- Rigina, O., y M. S. Rasmussen. 2003. Using trend line and principal component analysis to study vegetation changes in Senegal 1986—1999 from AVHRR NDVI 8 km data. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 103:31–42.
- Roldán, P., y G. Poveda. 2006. Variabilidad espacio-temporal de los índices NDVI y EVI. Aplicación a Cinco Regiones Colombianas:47–59.
- Ruiz, J. P., y F. Reyes. 2014. Análisis temporal de la actividad fotosintética en la provincia de Loja, Ecuador. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Shao, Y., G. N. Taff, y R. S. Lunetta. 2011. A review of selected MODIS algorithms, data products, and applications. *Environmental Protection*. CRC Press . *Advances in Remote Sensing*, Boca Raton, FL.

- Solano, R., K. Didan, A. Jacobson, y A. Huete. 2010. MODIS Vegetation Index User ' s Guide (MOD13 Series). The University of Arizona.
- Velásquez Milla, D. 2010. La función de la biodiversidad. LEISA revista de agroecología:32–35.
- Waring, R. H., N. C. Coops, W. Fan, and J. M. Nightingale. 2006. MODIS enhanced vegetation index predicts tree species richness across forested ecoregions in the contiguous U.S.A. *Remote Sensing of Environment* 103:218–226.
- Waylen, P., J. Southworth, C. Gibbes, y H. Tsai. 2014. Time series analysis of land cover change: Developing statistical tools to determine significance of land cover changes in persistence analyses. *Remote Sensing* 6:4473–4497.
- Wolter, K., y M. S. Timlin. 1998. Measuring the strength of ENSO events: how does 1997/98 rank? *Weather* 53:315–324.
- Yue, S., y C. Y. Wang. 2002. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research* 38:4–1–4–7.
- Zhang, Z., C.-Y. Xu, M. E.-H. El-Tahir, J. Cao, y V. P. Singh. 2012. Spatial and temporal variation of precipitation in Sudan and their possible causes during 1948–2005. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26:429–441.