

## **Análisis del Comportamiento de la Vegetación a partir de Índices del Sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina**

### **Vegetation Behavior Analysis from MODIS Sensor Indices, in Santa Cruz, Argentina**

Barbara KLIMISCH, Dora MAGLIONE Paula PAREDES, Julio SOTO  
klmisch48@hotmail.com, dmaglione@uarg.unpa.edu.ar, pparedes@uarg.unpa.edu.ar,  
jsoto@uarg.unpa.edu.ar

Unidad Académica Río Gallegos - Universidad Nacional de la Patagonia Austral - Instituto de Trabajo, Economía y Territorio (ITET). Río Gallegos, Santa Cruz - Argentina.

*Recibido: 19/04/2021. Aceptado: 11/11/2022*

### **RESUMEN**

El uso de sensores remotos permite la evaluación y manejo de la vegetación, en grandes extensiones y a bajo costo. Algunos atributos de la cobertura vegetal, como Productividad Primaria Neta y temporada de crecimiento, son obtenidos a partir de los índices de vegetación generados con esta tecnología. El objetivo de este trabajo fue analizar cuatro índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI y ARVI) en las áreas ecológicas de la provincia de Santa Cruz, con datos del sensor MOD13Q1, desde febrero 2000 a marzo 2021. Los datos, promedios por área, fueron obtenidos utilizando Google Earth Engine y analizados estadísticamente con el programa R-Studio. Para cada índice se obtuvieron medidas descriptivas y los atributos de la curva media anual. Se analizó la correlación entre índices. Los cuatro índices identificaron los momentos de máxima productividad y resultaron correlacionados. El NDVI resultó ser el índice con mejor correlación, mostrando un comportamiento más homogéneo respecto de la vegetación. En relación a los atributos del NDVI, el Complejo Andino y Estepa Magallánica Húmeda, presentaron un máximo en octubre, Estepa Magallánica Seca tuvo un comportamiento bimodal (octubre y abril) y las demás áreas no presentaron patrones claros. Las diferencias encontradas posiblemente se deban a la heterogeneidad propia de cada región. Esto podría comprobarse estudiando sitios representativos dentro de cada área.

**Palabras Clave:** NDVI; EVI; SAVI; ARVI; Áreas Ecológicas.

### **ABSTRACT**

The use of remote sensing allows the evaluation and management of vegetation, in large extensions and at low cost. Some attributes of vegetation cover, such as Net Primary Productivity and growing season, are obtained from the vegetation indices generated with this technology. The objective of this work was to analyse four vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI and ARVI) in ecological areas of the province of Santa Cruz, with data from the MOD13Q1 sensor, from February 2000 to March 2021. The data, averaged by area, were obtained using Google Earth Engine and statistically analysed with the R-Studio program. Descriptive measures and the attributes of the annual mean curve attributes were obtained for each index. The correlation between indices was analysed. The four indices identified the moments of maximum productivity and were correlated. The NDVI was the index with the best correlation, showing a more homogeneous behaviour with respect to the vegetation. In relation



to the attributes of the NDVI, Andean Complex and Humid Magellanic Steppe showed a maximum in October, Dry Magellanic Steppe had a bimodal behaviour (October and April) and the other areas did not show clear patterns. The differences found are possibly due to the heterogeneity of each region. This could be verified by studying representative sites within each area.

**Keywords:** NDVI; EVI; SAVI; ARVI; Ecological Areas

## 1. INTRODUCCIÓN

La provincia de Santa Cruz se ubica en la Patagonia, en la región austral de la Argentina continental. Posee una gran extensión, con diversos tipos de vegetación y ambientes como bosques, pastizales y mallines, que son relevantes en términos de producción, por su aporte nutricional a la ganadería.

Oliva et al. (2001), establecieron para la provincia de Santa Cruz, ocho áreas ecológicas: Matorral de Mata Negra, Pastizal Subandino, Golfo San Jorge, Sierras y Mesetas Occidentales, Estepa Magallánica Seca, Estepa Magallánica Húmeda, Complejo Andino y Distrito Central. Regiones, que a determinada escala, presentan características edáficas, climáticas y de vegetación similares.

La necesidad de monitoreo y evaluación de la vegetación en ecosistemas de la Patagonia, requiere herramientas que permitan la obtención precisa y permanente de datos. La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), representa la disponibilidad energética de las plantas para los organismos consumidores y es un estimador de la productividad biológica. Está fuertemente vinculada a aspectos estructurales, como la biomasa de herbívoros, y funcionales como la productividad secundaria de los ecosistemas (Paruelo, 2008). El uso de sensores remotos ha permitido la obtención de datos climatológicos, así como la determinación de variables de interés de los recursos naturales, especialmente en sitios de difícil acceso o en grandes extensiones. El reciente avance tecnológico, mejoras en la resolución de las imágenes satelitales, ha permitido el monitoreo de cobertura del suelo a través de los índices de vegetación (Gaitán et al., 2015). Su aplicación ha generado información sobre características de la superficie terrestre, permitiendo el desarrollo de diversos índices. Uno de estos índices es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que ha mostrado una significativa relación con aspectos de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, como la PPNA entre otros (Gaitán et al. 2021), por ello es uno de los más utilizados (Beck et al., 2006). Existen otros índices de vegetación, estimadores de la cantidad de biomasa fotosintéticamente activa, como el *Enhanced Vegetation Index* (EVI); y el *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI) y el *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), que minimizan el efecto de la reflexión provocada por el suelo.

A partir de las curvas de comportamiento medio anual, de cada índice de vegetación, es posible calcular atributos, asociados a aspectos fenológicos, tales como el inicio y fin de la estación de crecimiento (duración de la estación de crecimiento), valor y momento máximo y mínimo, así como productividad vegetal, entre otros.

El objetivo de este trabajo es analizar cuatro índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI y ARVI) dentro de cada una de las áreas ecológicas de la provincia de Santa Cruz a partir de los datos obtenidos del sensor MOD13Q1, en el periodo comprendido entre febrero 2000 - marzo 2021.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Área de Estudio

La provincia de Santa Cruz se ubica al sur de la región patagónica (entre los 46° y 52°23' de latitud S y entre los 65°43' y 73°35' de longitud O) y posee un clima árido y semiárido. La temperatura anual promedio oscila entre 7 a 9°C y la precipitación anual es de 250 mm, en la mayor parte del territorio. Hacia el oeste, los valores de precipitaciones superan los 700 mm (nivales y pluviales). Existen en la provincia diversidad de ambientes naturales, determinados por el clima y el suelo, y caracterizados por diversos tipos de vegetación (Cuadra y Oliva 1996).

#### 2.1.1 Áreas Ecológicas (AE)

La clasificación de las unidades ecológicas de Santa Cruz, se nutre de una serie de trabajos preexistentes, hasta llegar a Cuadra y Oliva (1996). Bajo la reinterpretación de los límites entre las unidades y sobre un mosaico rectificadado de imágenes Landsat TM (Rial y González, 2000), la actual clasificación, presentada por Oliva et al. (2001) divide a la provincia en 8 regiones agrupadas por características edáficas, climáticas y de vegetación semejantes (Figura 1). Se describen a continuación clima y vegetación de las mencionadas regiones:

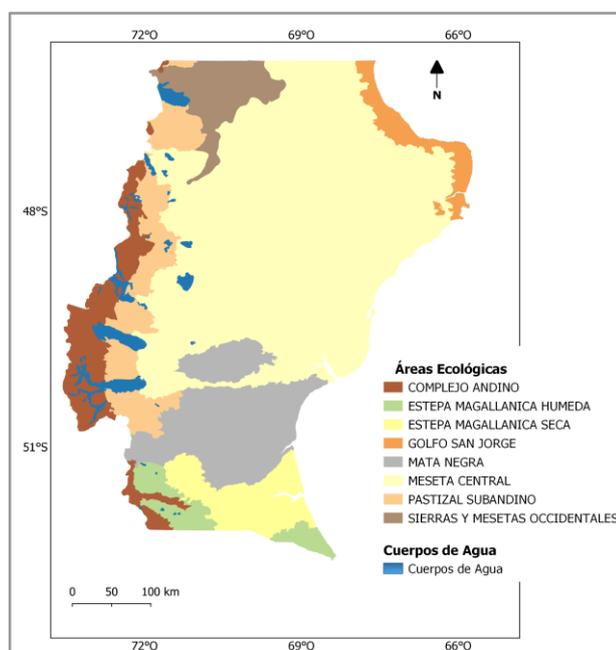


Figura 1. Mapa Áreas Ecológicas de Santa Cruz (Adaptado de Oliva et al., 2001).

#### a. Matorral de Mata Negra (MMN)

El clima de la región, frío árido de meseta y costero, está definido por temperaturas medias entre 6,5 - 8,5 °C y precipitaciones anuales que oscilan entre los 150 y 200 mm, con un máximo invernal. El Matorral de Mata Negra, se ubica al sureste de la provincia de Santa Cruz y el área ecológica corresponde a una estepa arbustiva dominada por *Mulguraea tridens* (mata negra) que se extiende en forma continua y en algunas áreas forma mosaicos con estepas gramíneas de *Pappostipa chrysophylla* (coirón amargo) o de *Festuca pallescens* (coirón blanco) (Cuadra y Oliva 1996).

#### b. Pastizal Subandino (PSA)

En relación a las variables climáticas, el pastizal subandino presenta una temperatura anual promedio de 7 a 8 °C. El régimen de lluvias durante el año es isohigro, con un marcado gradiente de precipitaciones en sentido oeste - este: 200 mm anuales en el este y 300-400 mm en áreas aledañas al bosque andino patagónico, en la región oeste (Buono et al., 2020; Oliva et al., 2001).

La vegetación corresponde a una Estepa gramínea dominada por *Festuca palleescens*, que suele estar acompañado por *Festuca argentina*, y que ocupa las laderas orientales de los Andes y mesetas elevadas. Integran la vegetación también: coirón amargo, *Poa spiciformis* y los arbustos *Mulinum spinosum* (neneo), *Berberis buxifolia* (calafate), *Mulguraea tridens* y *Senecio filaginoides* (mata mora).

c. Estepa Arbustiva del Golfo San Jorge (GSJ)

El clima en el Golfo San Jorge es semiárido patagónico, templado - frío. Las condiciones climáticas son moduladas por el océano. La temperatura media anual es de 13,1 °C, con medias de 6 °C en invierno y 20 °C en verano, los meses más cálidos se encuentran entre diciembre y febrero. La precipitación media anual es de 250 mm, y el período de sequía corresponde a los meses de verano (Dans et al, 2020).

En cuanto a la vegetación, presenta arbustales altos, que pueden alcanzar 3 metros o más de altura (Buono et al., 2020). Entre las especies de arbustos se encuentran la *Retanilla patagonica*, *Colliguaja integerrima*, *Mulinum spinosum*, *Verbena alatocarpa*, *Ephedra ochreatea*, *Lycium chilense* y *Anarthrophyllum rigidum*. Las gramíneas *Pappostipa humilis* y *Festuca argentina*, son las más abundantes (Buono et al., 2020; Oliva et al., 2001).

d. Sierras y Mesetas Occidentales (SyMO)

En las Sierras y Mesetas Occidentales el clima es Frío árido de meseta, con temperaturas media anuales de 8,5 a 9,5 °C y escasas precipitaciones (100 - 200 mm anuales) en otoño e invierno (régimen mediterráneo). La vegetación, estepa arbustiva abierta, está dominada por arbustos como *Mulinum spinosum*, *Senecio filaginoides* y *Adesmia campestris*, con manchones de coirones (*Pappostipa speciosa*, *Pappostipa humilis* -coirón llama- y *Poa ligularis*) (Buono et al., 2020; Oliva et al., 2001)

e. Estepa Magallánica Seca (EMS)

La temperatura promedio anual es de 6 a 7° C. La precipitación se distribuye todo el año, con un máximo estival, y un suave gradiente. En el límite con el área Matorral de Mata Negra el promedio es de 170 mm anuales y en la región sur - este, por la influencia del océano Atlántico, varía entre 200 y 300 mm.

La vegetación de la Estepa Magallánica Seca, oscila entre coberturas del 50 - 70 %, dominada por *Festuca gracillima* y puede presentar arbustos aislados (*Berberis microphylla* y *Mulguraea tridens*). Otras gramíneas que se pueden encontrar son *Festuca palleescens*, *Hordeum comosum*, *Poa spiciformis*, *Bromus setifolius* y *Rytidosperma virescens*, así como gramíneas del género *Carex*.

f. Estepa Magallánica Húmeda (EMH)

El clima es subhúmedo con características oceánicas, por el ingreso de vientos húmedos provenientes del océano Pacífico. Precipitaciones en un rango de 200 a 400 mm, se distribuyen durante todo el año, con un máximo en los meses de verano. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 5,5 y 6,5 °C.

Estepa Gramínea, dominada por *Festuca gracillima*, ubicada al sudeste de Santa Cruz, en la región de Cabo Vírgenes. De características fisonómicas similares a EMS, pero con arbustales de *Chilliotrichum diffusum* (mata negra fueguina) y extensas áreas dominadas por *Empetrum rubrum* (murtilla).

g. Complejo Andino (CA)

El clima es Frío húmedo, con un marcado gradiente de precipitación que, en sentido este-oeste, va desde los 300 a 1000 mm anuales. Las temperaturas medias oscilan entre 5,5 y 8°C.

En las regiones de ecotono, hacia el Pastizales subandino, domina la vegetación con *Nothofagus antarctica*. En límite altitudinal y en las zonas más húmedas de la región boscosa, el *Nothofagus pumilio*. Otras especies arbóreas, presentes en bosques bajos, con precipitaciones promedios de 1000 mm, son el *Nothofagus betuloides* y el *Drymis winteri*. Entre los arbustos se destacan *Embothrium coccineum* (notro), *Pernetia mucronata*, *Escallonia rubra* y la *Fuchsia*

*magellanica*. Los claros en el bosque, valles y costas lacustres se cubren de densas praderas de *Poa pratensis*, *Deschampsia sp.* y *Agrostis sp.*

h. Distrito

Central (DC)

Se ubica en el centro y norte de Santa Cruz, con un clima predominante Frío Árido de Meseta, con promedios térmicos de 8 a 10 °C de sudoeste a noreste y precipitaciones anuales de concentración invernal de 150 mm o menos, que en la región costera pueden superar los 200 mm anuales.

La vegetación asociada incluye arbustales en el fondo de cañadones, áreas de coironales y desiertos de especies efímeras. La vegetación generalmente se presenta como una estepa de arbustos bajos y baja cobertura vegetal (20 - 30 %). Asimismo, se pueden encontrar, siguiendo las líneas de escorrentía, arbustos de mayor porte y grandes áreas cubiertas de pavimento de erosión en sitios de relieve plano.

## 2.2. Índices de Vegetación

A continuación, se describen los índices de vegetación analizados en este trabajo.

a. *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

donde R e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja (620 - 670 nm) e infrarrojo cercano (841-876 nm) del espectro electromagnético respectivamente.

El NDVI fue desarrollado en 1979 por Compton Tucker, en el Goddard Space Flight Center de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Este índice, relaciona la reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (R), debido a la absorción por parte de la clorofila, y el infrarrojo cercano (IRC), debido a la estructura del mesófilo de las hojas. Integrando de este modo el comportamiento de los tejidos fotosintéticos en una ecuación (Paruelo, 2008). Por ello, el NDVI es sensible a las modificaciones del índice de área foliar, se encuentra vinculado a la biomasa, cobertura y producción primaria neta aérea de la vegetación (Tucker et al. 1985; Gaitán et al. 2013).

b. *Enhanced Vegetation Index (EVI)*

$$EVI = 2.5 \times (IR - R) / (IR + C1 \times R - C2 \times B + L)$$

donde B, corresponde a las reflectancias corregidas atmosféricamente de la porción del azul del espectro electromagnético (459 - 479 nm). Los símbolos C1 y C2, son coeficientes que consideran la presencia de aerosoles y utilizan la banda azul para corregir la reflectancia en la porción roja. R e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja e infrarroja del espectro.

El índice EVI, similar al NDVI, posee una relación directa con el índice de área foliar, productividad primaria neta, biomasa, cobertura, radiación fotosintéticamente activa. Incorpora además la banda azul del espectro y el coeficiente de corrección atmosférica. Desarrollado por Huete et al. (2002), específicamente para el sensor MODIS, su fórmula busca desdoblarse la señal del suelo de la vegetación, así como minimizar la influencia de la atmósfera (Paruelo, 2008).

c. *Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*

$$SAVI = [(IR - R) / (IR + R + L)] \times (1 + L)$$

donde L es un parámetro de valor constante. Asimismo, R e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja e infrarroja del espectro. Huete (1998) propone tres valores para el factor del suelo, en el cálculo de SAVI, que corresponden a 0,2, 0,5 y 0,9 (de mayor a menor cobertura vegetal). En este trabajo, para Distrito Central se utilizó el valor 1, y 0,5 para el resto de las áreas ecológicas.

Con el fin de disminuir los efectos del suelo en áreas con baja densidad de vegetación, Huete (1988), definió el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, al incorporar una transformación que elimina la influencia del suelo, principal inconveniente del NDVI.

d. *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)*

$$ARVI = (IR - (2R + B)) / (IR + (2R + B))$$

donde R, B e IR corresponden a la reflectancia en la porción roja, azul e infrarrojo cercano del espectro.

Es el primer índice de vegetación que es relativamente propenso a los factores atmosféricos

(como el aerosol). La fórmula del ARVI propuesta por Kaufman y Tanré (1992), es una corrección del NDVI, para disminuir los efectos de dispersión atmosférica en la reflectancia de la banda roja. Su uso suele enfocarse sobre regiones con alto contenido de aerosol atmosférico (por ejemplo, lluvia, niebla, polvo, humo, contaminación del aire).

### 2.3 Atributos Funcionales

La curva estacional del índice de vegetación normalizado, estima una serie de atributos que caracterizan el comportamiento funcional de distintos ecosistemas (Paruelo et al., 1998) (Figura 2).

Entre los atributos determinados la Integral Anual (IVN-I), calculada como el promedio de los valores de NDVI, permite estimar la absorción total de radiación por la vegetación (Paruelo, et al., 1998; Pettoelli, 2005). El Rango Relativo Anual (RRA), indicador de la estacionalidad en la absorción de radiación, está definido como la diferencia entre el máximo y el mínimo de cada índice, dividida por su valor Integral Anual. Finalmente, a partir de la interpretación gráfica y de los datos se determina el momento de mínimo y máximo (Paruelo et al., 2011).

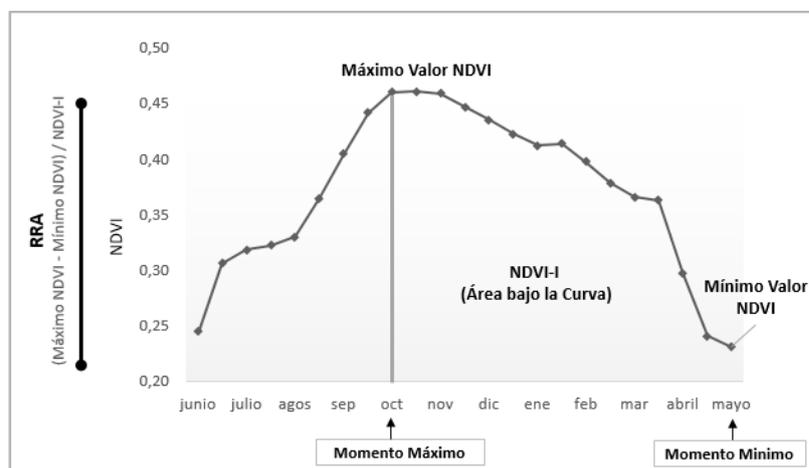


Figura 2. Curva estacional NDVI y atributos funcionales (Adaptado de Paruelo, 2008).

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Obtención de Datos

Se obtuvieron datos, utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE), a partir del producto MOD13Q1 (cada 16 días, 250 m de tamaño de píxel) sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) para el período febrero 2000 - marzo 2021. Se extrajeron los valores promedio por área ecológica de las bandas NDVI, EVI, Rojo (620 - 670 nm), Azul (459 - 479 nm), Infrarrojo Cercano (IRC)(841-876 nm) e Infrarrojo Medio (IRM)(2105 - 2155 nm), con las cuales se calcularon los índices SAVI y ARVI. Se utilizó la banda “SummaryQA” para seleccionar sólo los píxeles de buena calidad.

### 3.2 Análisis de Datos

#### 3.2.1 Análisis Descriptivo de los Índices

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para todos los índices, por área ecológica, calculando las medidas de tendencia central, dispersión y de forma.

Asimismo, se extrajeron los atributos funcionales (Integral Anual, RRA, Momento máximo y Momento mínimo) de cada índice y región, elaborando su respectiva curva. La bibliografía consultada (Paruelo y Lauenroth, 1998) hace referencia solo a los atributos funcionales del

NDVI. Sin embargo, en este trabajo fueron también determinados para los índices EVI, SAVI y ARVI.

### 3.2.2. Metodología para la Selección de un Índice

Una vez estudiados y calculados los índices NDVI, EVI, SAVI y ARVI, para cada región ecológica, se determinaron sus respectivas correlaciones.

Con el fin de seleccionar un índice de vegetación, que permita comparar el comportamiento de las series temporales y los atributos funcionales de las áreas ecológicas, se estableció como criterio una alta correlación ( $> 0,80$ ) con todos los índices analizados. Asimismo, otro criterio para la elección del indicador, fue la alta disponibilidad de información bibliográfica (Paruelo, et al., 1998; Pettorelli et al., 2005; Gaitán et al., 2013) que permitió investigar su uso a escala global, en la región patagónica en general y en particular en la zona bajo estudio.

### 3.2.3 Análisis descriptivo y temporal del índice seleccionado

Para el índice seleccionado, además del análisis exploratorio (histograma de frecuencias), se realizó un análisis temporal a partir de los datos graficados (Seasonal Plot - R Studio), de acuerdo a la resolución temporal (16 días), que permitió la observación del comportamiento de la serie. La representación de las medias mensuales, permitió visualizar el comportamiento estacional correspondiente a cada área ecológica. Asimismo, se aplicó el test de Shapiro-Wilk, que indica si los datos se distribuyen normalmente.

Finalmente, se aplicó la descomposición de la serie temporal 2000 - 2021. Para ello se empleó un modelo aditivo:  $Y_i = T_i + S_i + e_i$  donde  $Y_i$  es la variable observada,  $T_i$  es la tendencia,  $S_i$  es la componente estacional y  $e_i$  es el error aleatorio, en el tiempo  $i$ . La *tendencia* representa el comportamiento a largo plazo de la serie, el *efecto estacional* describe sus fluctuaciones periódicas y el *residual* representa las variaciones impredecibles, a corto plazo. Cuando los componentes se combinan de forma aditiva, el incremento, como consecuencia de la estacionalidad, es similar (Catalán, 2004).

En primer lugar, se estimó la tendencia usando medias móviles mediante una ventana simétrica alrededor de cada punto. Luego, se eliminó la tendencia de la serie para calcular la componente estacional mediante promedios para cada periodo. Finalmente, el estimador del error aleatorio se obtuvo al eliminar la componente estacional de la última serie.

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa R (Core Team, 2018).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis Descriptivo de los Índices

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos descriptivos: medidas de tendencia central de dispersión y de forma de los índices analizados, para cada área ecológica.

Las medidas de tendencia central (Tabla 1), muestran mayores valores promedios de NDVI en las áreas ecológicas EMH, EMS, CA; siendo los más bajos los correspondientes a las áreas DC y SyMO. El DC y la EMS son las áreas que presentan mayor variabilidad, de acuerdo al coeficiente de variación. Un comportamiento similar se observa para el índice EVI. Por su parte, SAVI y ARVI mostraron valores medios más altos en la EMH y CA, mientras que los menores se dieron en SyMO y DC. La mayor variabilidad para SAVI también se observó en la EMS, no así para ARVI, dado que GSJ y SyMO presentaron valores extremadamente mayores. Finalmente la EMS, presentó una alta variabilidad, en relación a todas las medidas de dispersión, tanto para el NDVI, como para todos los índices estudiados.

	DC	MMN	PSA	GSJ	SyMO	EMS	EMH	CA	
NDVI	Mínimo	-0,0677	0,0022	0,0829	0,1467	0,1448	0,1138	0,0457	
	Máximo	0,2724	0,3697	0,3423	0,3625	0,2901	0,4789	0,5110	
	<b>Media</b>	<b>0,1269</b>	<b>0,2316</b>	<b>0,2581</b>	<b>0,2095</b>	<b>0,1923</b>	<b>0,3027</b>	<b>0,4303</b>	<b>0,3708</b>
	Desv. Estándar	0,0727	0,0598	0,0267	0,0392	0,0200	0,3330	0,0790	0,0790
	Mediana	0,1590	0,2457	0,2597	0,2022	0,1899	0,3610	0,4461	0,3825
	Coef. Variación	57,2948	25,8432	10,3340	18,6939	10,4124	110,0202	18,3508	21,3026
EVI	Mínimo	-0,0199	0,0140	0,0129	0,0759	0,0582	0,0621	0,0388	0,0241
	Máximo	0,1029	0,1938	0,1789	0,1335	0,1178	0,2419	0,3202	0,3005
	<b>Media</b>	<b>0,0638</b>	<b>0,1069</b>	<b>0,1236</b>	<b>0,0995</b>	<b>0,0881</b>	<b>0,1352</b>	<b>0,2192</b>	<b>0,1883</b>
	Desv. Estándar	0,0342	0,0298	0,0223	0,0114	0,0112	0,1531	0,0537	0,0599
	Mediana	0,0709	0,1110	0,1221	0,0981	0,0879	0,1762	0,2236	0,1859
	Coef. Variación	53,6386	27,9165	18,0354	11,4326	12,7128	113,2436	24,5107	31,7965
SAVI	Mínimo	-0,2673	0,0160	0,0252	0,0824	0,0644	0,0722	0,0413	0,0214
	Máximo	0,5183	0,2063	0,1865	0,1441	0,1273	0,2560	0,3371	0,3077
	<b>Media</b>	<b>0,0565</b>	<b>0,1161</b>	<b>0,1321</b>	<b>0,1068</b>	<b>0,0960</b>	<b>0,1477</b>	<b>0,2355</b>	<b>0,1970</b>
	Desv. Estándar	0,0306	0,0320	0,0222	0,0119	0,0116	0,1668	0,0553	0,0589
	Mediana	0,0709	0,1220	0,1323	0,1053	0,0960	0,1906	0,2411	0,1998
	Coef. Variación	54,1541	27,5381	16,8016	11,1787	12,0963	112,9360	23,4670	29,8873
ARVI	Mínimo	-0,2529	-0,1274	-0,0432	-0,0339	-0,0328	0,0112	0,0429	0,0448
	Máximo	0,0903	0,2637	0,1357	0,1421	0,0670	0,2445	0,3369	0,2887
	<b>Media</b>	<b>-0,0472</b>	<b>0,0367</b>	<b>0,0597</b>	<b>0,0116</b>	<b>-0,0016</b>	<b>0,0859</b>	<b>0,2078</b>	<b>0,1621</b>
	Desv. Estándar	0,0449	0,0384	0,0220	0,0290	0,0142	0,1100	0,0650	0,0560
	Mediana	-0,0312	0,0395	0,0601	0,0071	-0,0040	0,1346	0,2143	0,1637
	Coef. Variación	95,0042	104,5999	36,9030	251,0381	902,5478	128,1472	31,2596	34,5217

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los índices NDVI, EVI, SAVI y ARVI para las áreas ecológicas Distrito Central (DC), Matorral de Mata Negra (MMN), Pastizal Subandino (PSA), Golfo San Jorge (GSJ), Sierras y Mesetas Occidentales (SyMO), Estepa Magallánica Seca (EMS), Estepa Magallánica Húmeda (EMH) y Complejo Andino (CA).

Se observa también en la tabla que los índices EVI, SAVI y ARVI presentan, en general, valores más bajos comparados con el NDVI. Por su parte, el índice EVI representa aproximadamente un 50% del valor de NDVI, en todas las áreas.

En la Tabla 2, se muestran los atributos de las curvas para cada región ecológica. Se puede observar que el IVN-I del DC posee los valores más bajos, mientras que la EMS, EMH y CA los más altos para todos los índices. Por su parte ARVI, presentó una Integral Anual más baja en general y un Rango Relativo más alto en comparación a los índices NDVI, EVI y SAVI.

Para las áreas ecológicas EMS, EMH y CA los momentos de máximo se dan en octubre y noviembre que corresponde al inicio de la primavera, y el momento de menor actividad fotosintética durante el mes de junio, para todos los índices bajo estudio. En el caso de PSA, se observa un comportamiento similar aunque desplazado en 1 o 2 meses posteriores. Por su parte, en el GSJ se observa que el momento de menor actividad fotosintética ocurre en febrero y el de mayor en junio u octubre, dependiendo del índice considerado. Para el MMN también, los momentos de máximo y mínimo dependen del qué índice utilizado, para NDVI y ARVI en mayo y marzo respectivamente, para EVI y SAVI los momentos de mayor y menor valor se alcanzan en los meses de noviembre y agosto. Finalmente, en el DC se observa máximos en junio-julio y el mínimo varía entre septiembre y febrero dependiendo del índice (Tabla 2, Figura 3).

		DC	MMN	PSA	GSJ	SyMO	EMS	EMH	CA
NDVI	Momento Mínimo	febrero	marzo	agosto	febrero	agosto	junio	junio	junio
	Momento Máximo	julio	mayo	diciembre	junio	junio	octubre	noviembre	noviembre
	IVN-I	0,1270	0,2316	0,2581	0,2097	0,1923	0,3328	0,4300	0,3706
	RRA	0,1741	0,0800	0,0641	0,1567	0,0689	0,0912	0,1641	0,1958
EVI	Momento Mínimo	septiembre	agosto	agosto	febrero	agosto	junio	junio	junio
	Momento Máximo	julio	noviembre	diciembre	octubre	noviembre	octubre	noviembre	noviembre
	IVN-I	0,0638	0,1069	0,1235	0,0996	0,0881	0,1556	0,2190	0,1881
	RRA	0,1354	0,1194	0,1656	0,0613	0,1059	0,1570	0,2313	0,3133
SAVI	Momento Mínimo	septiembre	agosto	agosto	febrero	agosto	junio	junio	junio
	Momento Máximo	junio	noviembre	diciembre	octubre	noviembre	octubre	noviembre	diciembre
	IVN-I	0,0682	0,1433	0,1651	0,1181	0,1107	0,2078	0,3040	0,2756
	RRA	0,1474	0,1107	0,1531	0,0605	0,0990	0,1476	0,2209	0,2921
ARVI	Momento Mínimo	febrero	marzo	agosto	febrero	agosto	junio	junio	junio
	Momento Máximo	julio	mayo	diciembre	junio	junio	octubre	noviembre	diciembre
	IVN-I	-0,0151	0,0571	0,0845	0,0478	0,0108	0,1564	0,2834	0,2408
	RRA	0,2974	0,3582	0,2455	2,0255	5,4329	0,2053	0,2867	0,3281

Tabla 2. Atributos funcionales: Momento Mínimo, Momento Máximo, Integral Anual y Rango Relativo Anual de los Índices de Vegetación NDVI, EVI, SAVI y ARVI, para las áreas ecológicas Distrito Central (DC), Matorral de Mata Negra (MMN), Pastizal Subandino (PSA), Golfo San Jorge (GSJ), Sierras y Mesetas Occidentales (SyMO), Estepa Magallánica Seca (EMS), Estepa Magallánica Húmeda (EMH) y Complejo Andino (CA).

En las curvas estacionales, SAVI y EVI presentan valores muy similares en todos los momentos del año (Figura 3). Siendo semejantes los valores promedio de NDVI (IVN-I), sus máximos y mínimos, que explican la actividad fotosintética, como también los meses de mayor y menor crecimiento de la vegetación, para ambos índices.

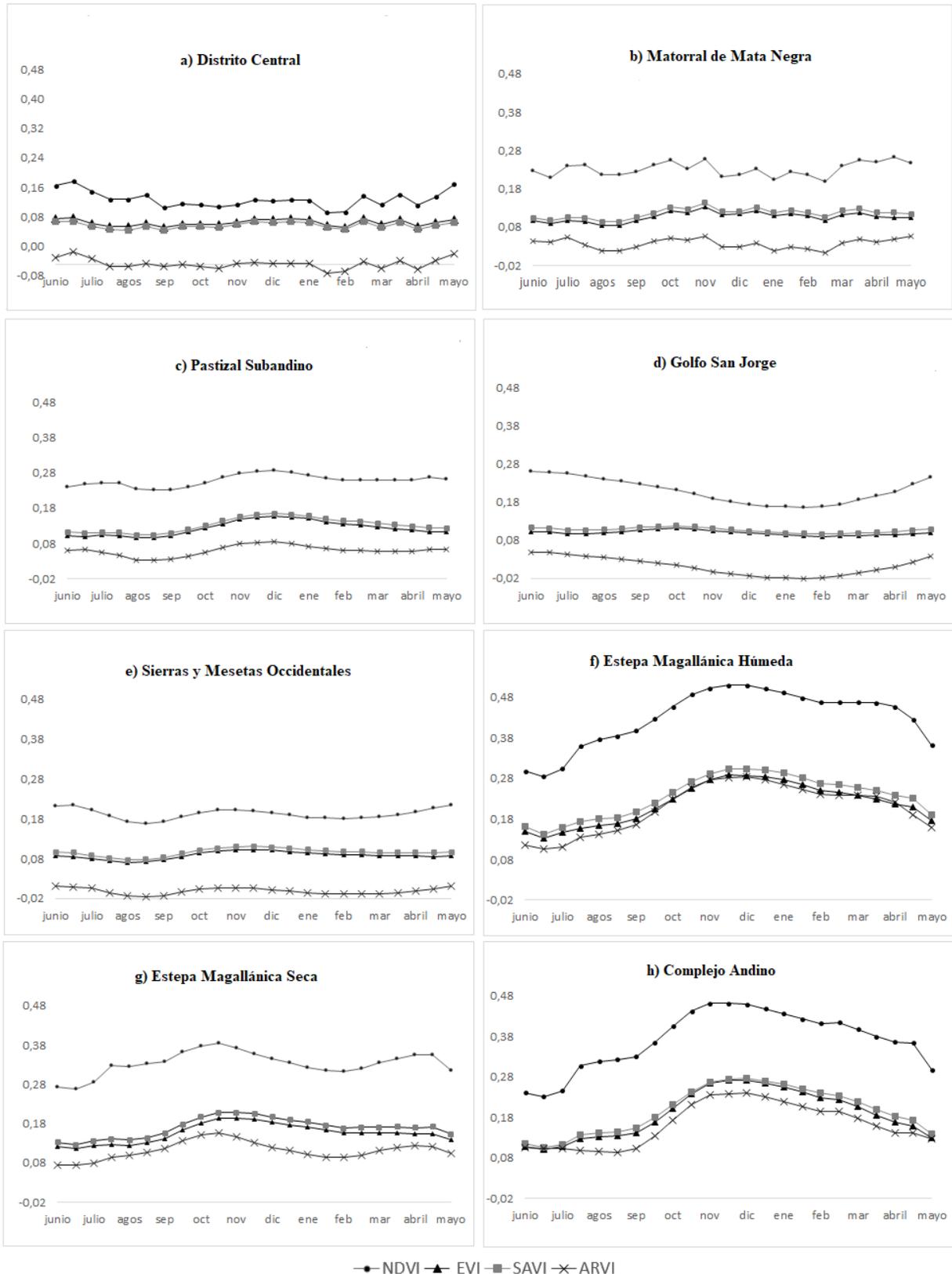


Figura 3. Comportamiento promedio anual de los Índices de Vegetación (NDVI, EVI, SAVI y ARVI) de las Áreas ecológicas: a) Distrito Central, b) Matorral de Mata Negra, c) Pastizal Subandino, d) Estepa Arbustiva del Golfo San Jorge, e) Sierras y Mesetas Occidentales, f) Estepa Magallánica Seca, g) Estepa Magallánica Húmeda, h) Complejo Andino.

## 4.2 Selección de un índice

Se presentan las correlaciones entre los diferentes índices para cada área ecológica, en la Tabla 3.

<b>a)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI	<b>b)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI
NDVI	1.0000	0.9422	0.9275	0.8899	NDVI	1.0000	0.8858	0.9040	0.8576
EVI	0.9422	1.0000	0.9888	0.8771	EVI	0.8858	1.0000	0.9969	0.7524
SAVI	0.9275	0.9888	1.0000	0.8832	SAVI	0.9040	0.9969	1.0000	0.7516
ARVI	0.8899	0.8771	0.8832	1.0000	ARVI	0.8576	0.7524	0.7516	1.0000
<b>c)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI	<b>d)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI
NDVI	1.0000	0.7959	0.8106	0.9397	NDVI	1.0000	0.5976	0.6883	0.9891
EVI	0.7959	1.0000	0.9973	0.7546	EVI	0.5976	1.0000	0.9909	0.6245
SAVI	0.8106	0.9973	1.0000	0.7693	SAVI	0.6883	0.9909	1.0000	0.7036
ARVI	0.9397	0.7546	0.7693	1.0000	ARVI	0.9891	0.6245	0.7036	1.0000
<b>e)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI	<b>f)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI
NDVI	1.0000	0.5996	0.6457	0.9649	NDVI	1.0000	0.7787	0.8027	0.9573
EVI	0.5996	1.0000	0.9940	0.6352	EVI	0.7787	1.0000	0.9962	0.7569
SAVI	0.6457	0.9940	1.0000	0.6582	SAVI	0.8027	0.9962	1.0000	0.7668
ARVI	0.9649	0.6352	0.6582	1.0000	ARVI	0.9573	0.7569	0.7668	1.0000
<b>g)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI	<b>h)</b>	NDVI	EVI	SAVI	ARVI
NDVI	1.0000	0.9373	0.9488	0.9426	NDVI	1.0000	0.9444	0.9595	0.8718
EVI	0.9373	1.0000	0.9976	0.9349	EVI	0.9444	1.0000	0.9957	0.9383
SAVI	0.9488	0.9976	1.0000	0.9339	SAVI	0.9595	0.9957	1.0000	0.9275
ARVI	0.9426	0.9349	0.9339	1.0000	ARVI	0.8718	0.9383	0.9275	1.0000

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre los índices NDVI, EVI, SAVI y ARVI de las áreas ecológicas estudiadas. a) Distrito Central, b) Matorral de Mata Negra, c) Pastizal Subandino, d) Estepa Arbustiva del Golfo San Jorge, e) Sierras y Mesetas Occidentales, f) Estepa Magallánica Seca, g) Estepa Magallánica Húmeda, h) Complejo Andino.

Todos los índices están altamente asociados entre sí (Tabla 3), en las áreas ecológicas estudiadas. Como se observó en los gráficos anteriores EVI y SAVI presentaban el mismo comportamiento, y la correlación entre ellos es casi perfecta. Pero el índice NDVI, es el que presenta correlaciones más altas en relación a los otros indicadores, en la mayoría de las zonas. Por ello y de acuerdo a los criterios mencionados, accesibilidad a la información bibliográfica y su facilidad de obtención, es el índice elegido.

## 4.3 Análisis descriptivo y temporal del índice seleccionado.

A continuación, se presenta la Tabla 4 con los estadísticos descriptivos del NDVI, correspondientes a las ocho áreas ecológicas de Santa Cruz.

	DC	MMN	PSA	GSJ	SyM	EMH	EMS	CA
Mínimo	-0,0677	0,0022	0,0829	0,1467	0,1448	0,1138	0,1138	0,0457
Máximo	0,2724	0,3697	0,3423	0,3625	0,2901	0,5593	0,5593	0,5110
Cuartil 1	0,0632	0,2020	0,2399	0,1774	0,1787	0,3847	0,3847	0,3291
Cuartil 3	0,1762	0,2698	0,2744	0,2348	0,2049	0,4906	0,4906	0,4306
Media	0,1269	0,2316	0,2581	0,2095	0,1923	0,4303	0,4303	0,3708
Mediana	0,1590	0,2457	0,2597	0,2022	0,1899	0,4461	0,4461	0,3825
Varianza	0,0053	0,0036	0,0007	0,0015	0,0004	0,0062	0,0062	0,0062
Desvio E.	0,0727	0,0598	0,0267	0,0392	0,0200	0,0790	0,0790	0,0790
Simetria	-0,8922	-0,8904	-0,8247	0,8162	0,7127	-1,1304	-1,1304	-1,0869
Curtosis	-0,3974	1,0870	4,9492	0,4992	1,3514	1,6108	1,6108	1,6161
N	486	486	486	486	486	486	486	486

Tabla 4. Medidas resúmenes del índice NDVI, para cada área ecológica (DC: Distrito Central, MMN: Matorral de Mata Negra, PSA: Pastizal Subandino, GSJ: Golfo San Jorge, SyMO Sierras y Mesetas Occidentales, EMS: Estepa Magallánica Seca, EMH: Estepa Magallánica Húmeda y CA: Complejo Andino).

La Figura 4 corresponde a la representación gráfica de los promedios mensuales de NDVI, para las áreas estudiadas, desde febrero 2000 a marzo 2021.

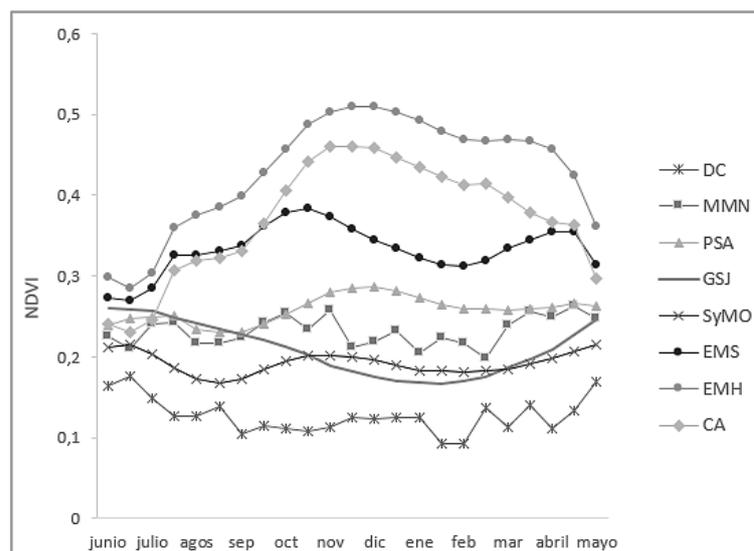


Figura 3. Comportamiento anual promedio de NDVI por áreas ecológicas (DC: Distrito Central, MMN: Matorral de Mata Negra, PSA: Pastizal Subandino, GSJ: Golfo San Jorge, SyMO Sierras y Mesetas Occidentales, EMS: Estepa Magallánica Seca, EMH: Estepa Magallánica Húmeda y CA: Complejo Andino)

Se realizaron gráficas analíticas de NDVI: a) histograma de frecuencia, b) box-plot de las mediciones tomadas a lo largo del año, c) Season-plot para los años analizados y d) la descomposición estructural de la serie (en orden: evolución temporal de los datos observados, tendencia, estacionalidad y error). Los gráficos box-plot y Season-plot, presentan 23 ciclos, que corresponden a la resolución temporal del sensor (cada 16 días) (Tabla 5). Se presenta el análisis de NDVI, por área ecológica:

Ciclo	Mes	Día	Ciclo	Mes	Día
1	enero	1	12	junio	26
2	enero	17	13	julio	12
3	febrero	2	14	julio	28
4	febrero	18	15	agosto	13
5	marzo	6	16	agosto	29
6	marzo	22	17	septiembre	13
7	abril	7	18	septiembre	29
8	abril	23	19	octubre	15
9	mayo	9	20	noviembre	1
10	mayo	25	21	noviembre	17
11	junio	10	22	diciembre	3
			23	diciembre	19

Tabla 5. Ciclos del sensor MODIS, mes y día de registro.

#### a) NDVI - Distrito Central

En esta área ecológica se observó un comportamiento bimodal del NDVI, Figura 5 (Histograma de frecuencias, gráfico a). También se encontró una alta dispersión de los datos durante casi todo el año (Gráfico Boxplot, b), con excepción de los meses abril, mayo y junio. La componente estacional de la descomposición temporal de la serie refleja también el comportamiento bimodal detectado en el histograma. Donde los años 2002, 2004, 2005, 2011, 2014, 2018 y 2020 presentan una marcada variabilidad (gráfico Seasonal Plot, c). Finalmente, la componente estacional de la Figura 5 d), presenta dos máximos locales (marzo y noviembre).

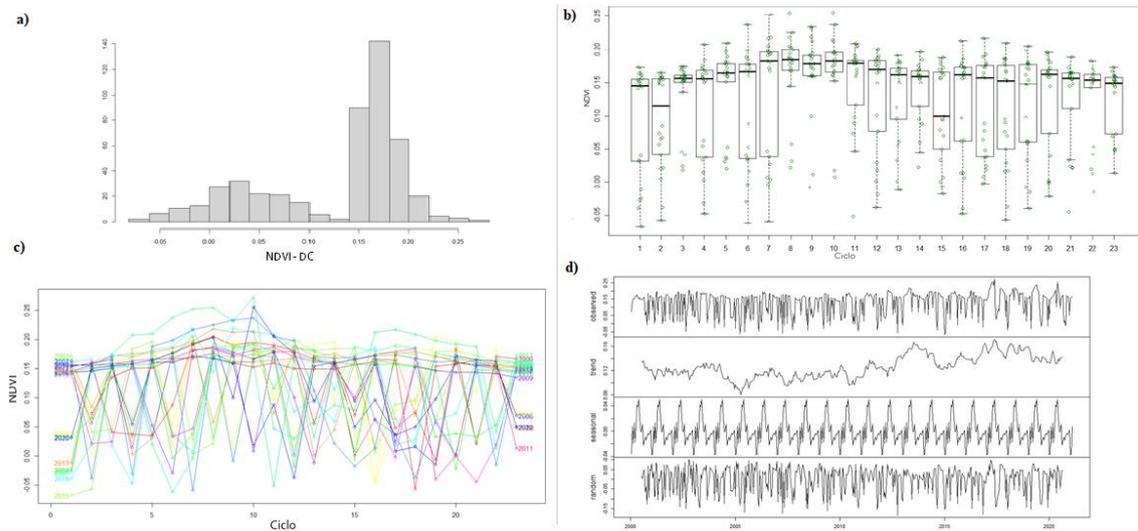


Figura 5. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente al Distrito Central, b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Estacionalidad, cada 16 días en DC, gráfico Season Plot, d) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

### b) NDVI - Matorral de Mata Negra

En el Matorral de Mata Negra, la distribución es sesgada a la derecha (Figura 6). Tanto en el gráfico boxplot, como en la componente estacional de la descomposición temporal, se observan distintos máximos locales a lo largo del año. Los años de mayor variabilidad para la serie son 2002, 2004, 2009, 2010 y 2020.

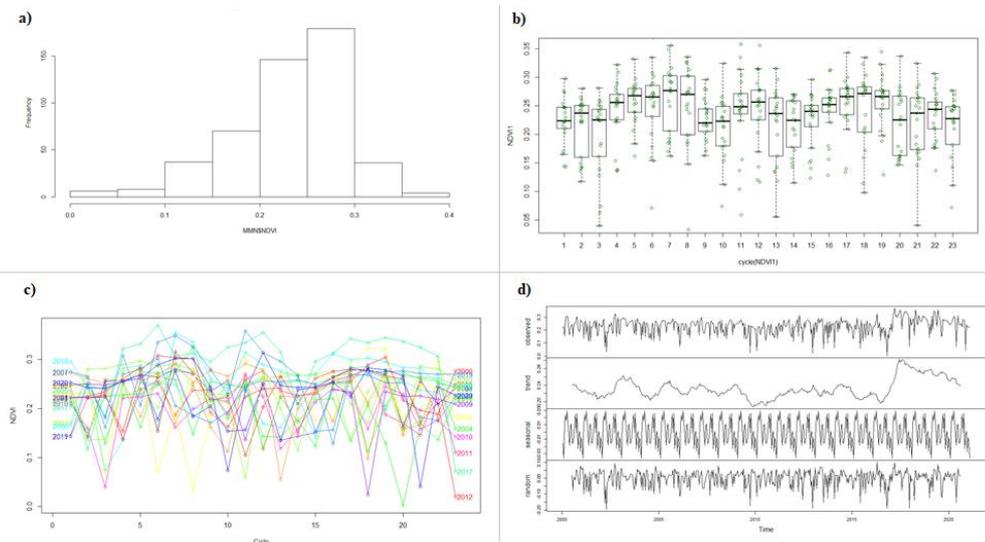


Figura 6. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente al Matorral de Mata Negra (MMN), b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en MMN, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

### c) NDVI - Pastizal Subandino

A partir de la Figura 7, se observa que esta área ecológica presenta una distribución sesgada a la derecha. Tanto desde el gráfico de box-plot como desde la componente estacional de la serie, se distinguen tres máximos, el mayor en noviembre, luego otro en abril y uno de menor intensidad en el mes de septiembre. Los años 2000 y 2001 mostraron gran variabilidad (gráfica c).

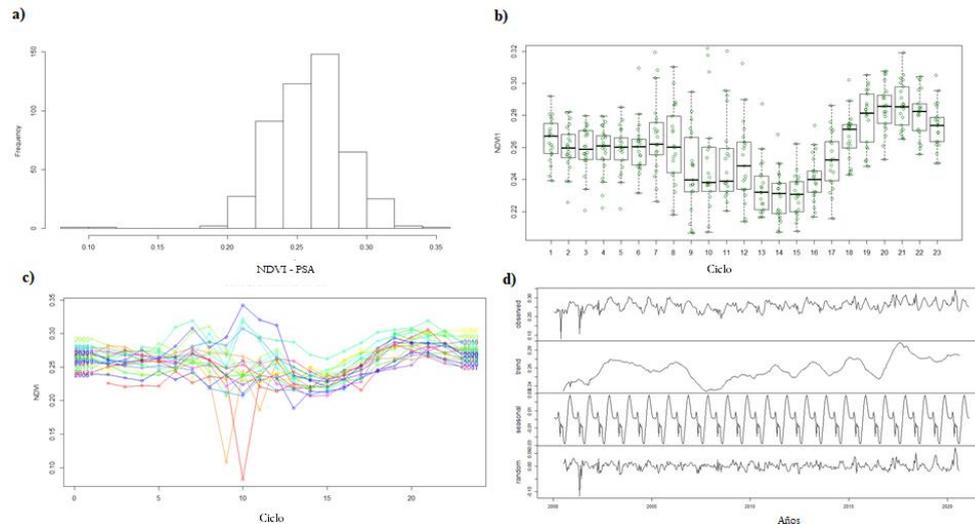


Figura 7. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente al Pastizal Subandino (PSA), b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en PSA, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

#### d) NDVI - Golfo San Jorge

El análisis NDVI del Golfo San Jorge (Figura 8), mostró una distribución sesgada a la izquierda, con un máximo único en junio, mes donde también se dio la mayor variabilidad, y el mínimo se presentó en febrero. En los años 2000, 2006 y 2008, la serie alcanzó valores por encima de lo normal. La variabilidad interanual es baja en esta área, a excepción del mes de mayo.

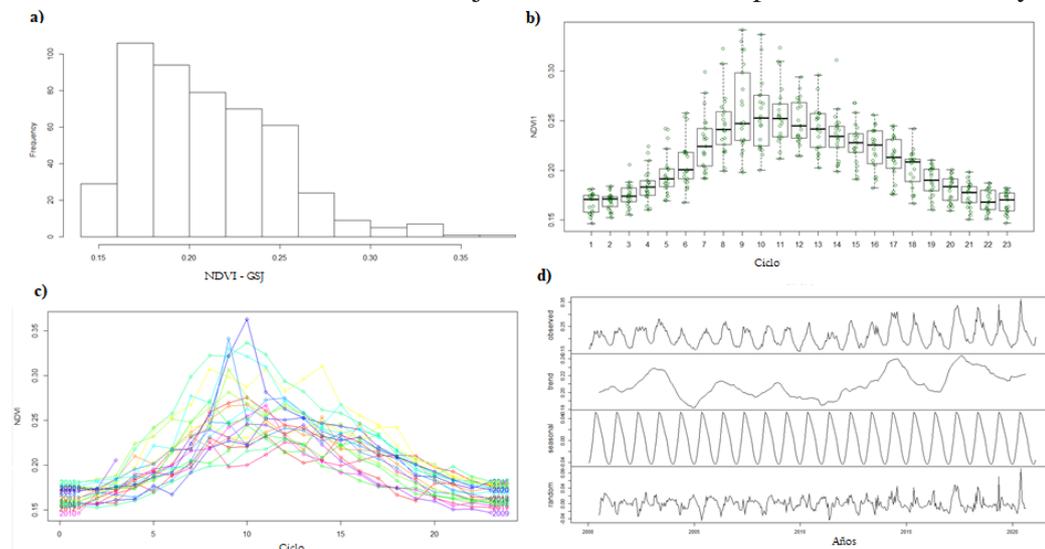


Figura 8. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente al Golfo San Jorge (GSJ), b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en GSJ, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

#### e) NDVI - Sierras y Mesetas Occidentales

En el área ecológica Sierras y Mesetas Occidentales se observa una distribución sesgada a la izquierda (Figura 9). El NDVI presenta dos máximos locales, el mayor durante mayo, el menor en octubre y los mínimos se dieron en enero y junio. La mayor variabilidad se presentó en los años 2008, 2012 y 2020.

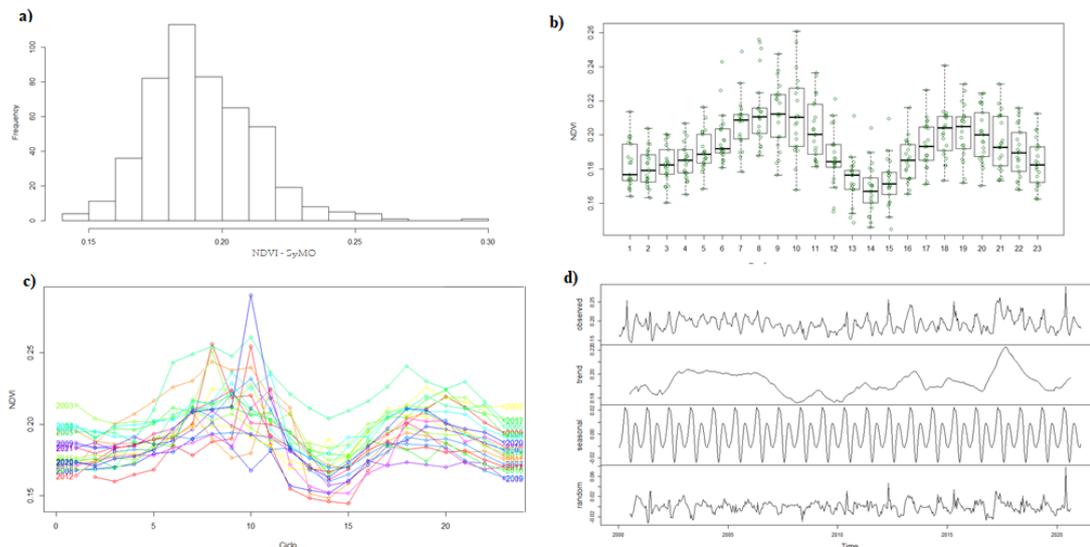


Figura 9. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente a Serranías y Mesetas Occidentales, b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en SyMO, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

### f) NDVI - Estepa Magallánica Seca

A partir de los gráficos (Figura 10) se observa una distribución normal, con presencia de dos máximos locales, el mayor en septiembre y un rebrote en marzo. Posee además, un mínimo local en el mes de junio. Se alcanzaron valores por debajo de lo normal durante junio del 2020 y valores por encima en los años 2012, 2014 y 2019.

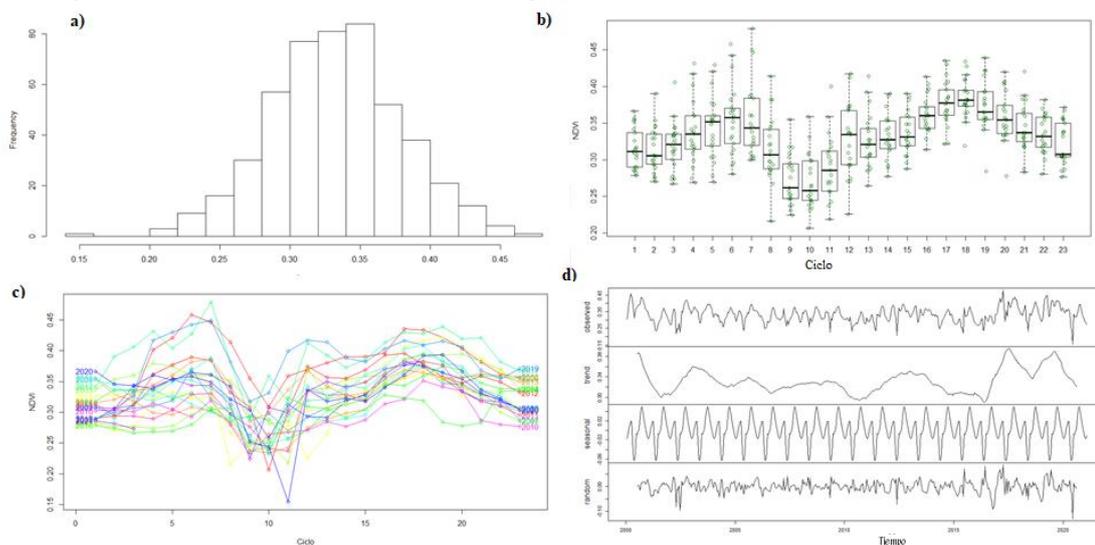


Figura 10. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente a Estepa Magallánica Seca, b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en EMS, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

### g) NDVI - Estepa Magallánica Húmeda

Presenta un máximo bien definido en noviembre y un mínimo para junio donde también se da la mayor variabilidad para la serie (Figura 11). La distribución es sesgada a la derecha. En los años 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2012 y 2018 se registraron los menores valores para el índice.

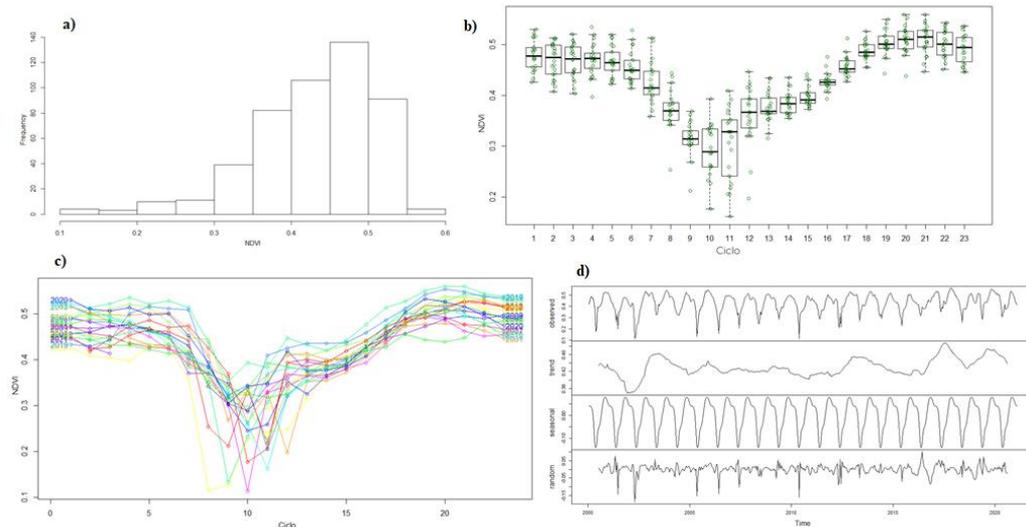


Figura 11. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente a Estepa Magallánica Húmeda, b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en EMH, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

## h) NDVI - Complejo Andino

El área ecológica Complejo Andino muestra una distribución sesgada a la derecha (Figura 12). En el gráfico boxplot, como en la componente estacional de la descomposición temporal, se observa un máximo en noviembre y un mínimo en los meses de mayo - junio, que se corresponde con los ciclos de mayor variabilidad para la serie. Asimismo, los años de mayor variabilidad para la serie son 2001, 2002, 2007, 2008, 2012, 2013 y 2014.

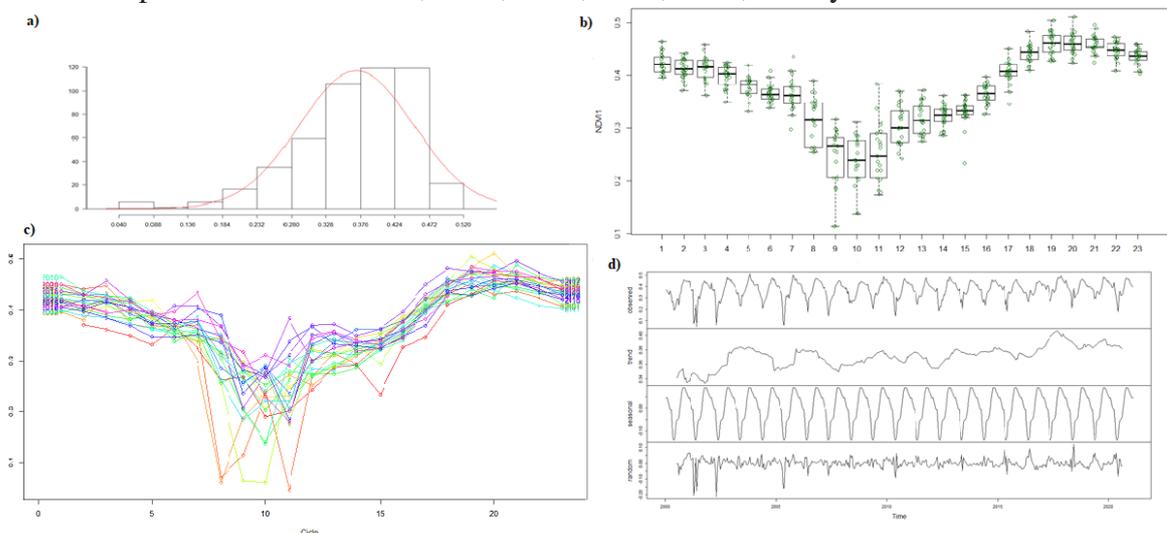


Figura 12. a) Histograma de frecuencia de la serie NDVI correspondiente a Complejo Andino, b) Gráfico Box-Plot, promedio NDVI cada 16 días en CA, desde febrero del 2000 al mes de marzo de 2021, c) Descomposición estructural de la Serie NDVI, por Medias Móviles.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los ecosistemas la vegetación constituye la base para el mantenimiento de la cadena trófica, es uno de los componentes del medio físico que contribuye al equilibrio del medio ambiente, y cumple un papel decisivo para el adecuado mantenimiento de otros componentes nativos como fauna, suelo, paisaje. Estudiar su comportamiento, temporal y espacialmente, permite establecer

un manejo adecuado de los recursos en general y de la vegetación en particular. En tal sentido, el uso de sensores remotos, ha permitido el estudio a bajo costo, de forma rápida y continua, principalmente a través de los *Índices de Vegetación*.

En este trabajo se analizaron los índices NDVI, EVI, SAVI y ARVI, considerando que cada uno de ellos presenta limitaciones. En el caso del NDVI, es sensible a los efectos del suelo y la atmósfera. El EVI optimiza la señal de la vegetación en casos de altas densidades con grandes cantidades de clorofila (mallines), y en ambientes de relieve con poca diferencia de altura. El SAVI fue diseñado para minimizar las influencias del brillo del suelo (color, humedad, variabilidad espacial, etc.), que pueden afectar a los resultados. Y el ARVI que es relativamente propenso a los factores atmosféricos, y su uso suele aplicarse sobre regiones con alto contenido de aerosol atmosférico (lluvia, niebla, polvo, humo, contaminación del aire). Por estas diferencias, es que se recomienda estudiar más de un índice en cada región.

Dentro de cada área ecológica, todos los índices mostraron un comportamiento similar, aunque con magnitudes diferentes. Al comparar los valores promedios de las áreas ecológicas, para cada índice, resultaron mayores EMH, EMS, CA y fueron más bajos DC y SyMO. Las medidas de tendencia central, media y mediana, resultaron más bajas para EVI, SAVI y ARVI comparados con el NDVI. EVI representó, en todas las áreas, aproximadamente un 50% del valor de NDVI. La variabilidad de los índices fue diferente en cada región. En cuanto al rango de variación la EMH y el CA mostraron una mayor diferencia entre el valor de máximo y el mínimo para cada índice, debido a que son las áreas ecológicas de mayor vegetación. En los casos de DC y MMN, el comportamiento medio anual no presentó patrones claros. La *Integral Anual* de los índices, resultó ser mayor para la EMH, CA y EMS, áreas de mayor productividad de la provincia, observándose los valores más bajos en el DC. El mayor valor de *Rango Relativo Anual* fue en CA. En EMH, EMS, PSA, CA, SyMO, los índices identificaron los mismos momentos máximos (durante la primavera-verano) y mínimos (en invierno), relacionado con el crecimiento de la vegetación. Sin embargo, en GSJ, DC y MMN, EVI y SAVI detectaron unos momentos máximos y mínimos, mientras que NDVI y ARVI otros. Probablemente estas diferencias se deban a que exista sensibilidad de los índices a las diferentes formas de vida, dado que en estas tres últimas áreas, las especies dominantes son leñosas perennes. Un estudio a campo con censos de vegetación, permitiría probar esta hipótesis.

En relación al comportamiento de los índices, se puede concluir en general que, a partir de la matriz de correlación, éstos están fuertemente asociados en todas las áreas ecológicas, especialmente en EMH, DC y CA. Igualmente, EVI y SAVI en todas las áreas mostraron una correlación prácticamente perfecta. En las áreas ecológicas MMN, PSA, EMS y EMH, el NDVI es el índice que mejor correlaciona con los demás, mientras que en las restantes zonas SAVI o EVI. De esta forma el NDVI es el índice que muestra un comportamiento más homogéneo en relación al conjunto de cubiertas vegetales. Carvacho Bart y Sánchez Martínez (2010) observaron un comportamiento similar para distintas coberturas de suelo, en dos períodos del año, en la región de O'Higgins en Chile, al comparar cinco índices, cuatro de los cuales fueron estudiados en este trabajo. Pettorelli et al., 2005, también analizaron diversos índices, y encontraron que el NDVI, ya aplicado con éxito en el monitoreo de productividad, así como en variación temporales, espaciales y la dinámica de la vegetación, podría ser una herramienta para estudiar la ecología y comprender la dinámica de distribución de la vegetación, incluso podría predecir efectos de cambio ambiental en los ecosistemas. Por las razones expuestas anteriormente, es que el NDVI fue seleccionado como base para un análisis más detallado dentro de cada área ecológica.

La distribución de frecuencias del índice NDVI fue diferente en cada región ecológica. Al analizar los histogramas, las áreas MMN, PSA, EMH y CA presentaron una distribución unimodal sesgada a derecha, mientras que en GSJ y SyMO la distribución fue sesgada a

izquierda. En el caso del DC, el histograma resultó bimodal, y en particular la EMS mostró una distribución normal ( $p$ -valor = 0,9920 para el test Shapiro - Wilk).

El análisis de las medias mensuales a lo largo del año, mostró en todas las áreas ecológicas estudiadas un comportamiento anual del NDVI diferente, principalmente al observar el momento del máximo, indicador del pico de acumulación de biomasa. En algunas zonas (EMH y CA) el comportamiento fue unimodal, con un pico máximo en noviembre. Mientras que en EMS se observaron dos momentos de crecimiento. Sin embargo, en PSA, GSJ y SyMO, el comportamiento se presentó suavizado, con menor Rango Relativo que en las áreas anteriores. En el DC y MMN, no hubo patrones claros.

La productividad primaria, variable asociada al rango relativo, fue diferente en cada región. Las áreas que presentaron una curva uni o bimodal (EMS, EMS y CA), parecen tener una mayor acumulación de biomasa dentro del año. Mientras que las mostraron un rango pequeño, tendrían poco crecimiento de la vegetación.

Las diferencias observadas en las curvas NDVI, podrían ser debido al tipo de vegetación, cobertura vegetal y clima dominante, presente en cada área ecológica. Las Estepas Magallánicas, con dominancia de gramíneas, que tienen un comportamiento más estacional, y altamente dependiente de las precipitaciones (principalmente de los pequeños pulsos), parecen presentar su máximo en el momento donde las temperaturas y precipitaciones permiten el crecimiento vegetal (Paredes, 2011). En CA, donde dominan los bosques caducifolios y pastizales de alta cobertura, estaría explicado por un comportamiento climático similar. En la región del GSJ, la vegetación dominante es arbustiva, pero presenta algunos pastos, que pueden responder más rápido a las precipitaciones; en esta área ecológica el máximo de precipitación ocurre en los meses de mayo - junio (Jobbagy et al., 1995), coincidiendo con el momento de mayor NDVI. Mientras en DC y MMN, la dominancia de arbustos, cuya dependencia hídrica es de las capas más profundas del suelo y no de los pequeños pulsos de precipitación, el comportamiento fue diferencial y no tan marcado como en las otras áreas. En DC, además de presentar arbustos bajos en general, las coberturas vegetales son cercanas al 50% (León et al., 1998), presentando grandes parches de vegetación con características distintas: matorrales de *Mulguraea tridens*, estepas arbustivas de *Nassauvia glomerulosa*, mallines y guadales.

El tipo de vegetación de cada área ecológica, considerada homogénea a escala provincial, varía espacialmente dentro de cada una, lo que permitiría explicar las diferencias observadas en las curvas de NDVI. Oyarzabal et al. (2018) diferencia dos regiones para el DC: una estepa arbustiva baja con algunos con dominancia de *Nassauvia glomerulosa*, *N. ulicina* o *Chuquiraga aurea* y, hacia la cordillera, la dominada por *Nardophyllum bryoides*. Baetti (2004) reconoce en el mapa fisonómicos florísticos de Santa Cruz, al menos 5 tipos diferentes de vegetación (Semidesierto, Estepa arbustiva, Estepa subarbustiva, Estepa gramínea y Pradera) dentro del DC. En la EMS puede observarse también esta diversidad, Schenkel et al. (2021) presentan diferentes condiciones de degradación para los tipos fisonómicos (Coironal, Coironal Subarbustivo, Coironal con *Pappostipa*, Estepa Subarbustiva con *Pappostipa chrysophylla* y Estepa Subarbustiva) dentro del área.

Para este trabajo no se calculó la estación de crecimiento de la vegetación, para lo cual existen diferentes metodologías (Paredes, 2011), sin embargo, observando las curvas anuales de NDVI, la EMH y CA son las zonas que presentan períodos más largos de crecimiento. Estas áreas, junto con PSA son las de mayor precipitación media anual, por lo que es esperable que esto ocurra.

La cobertura vegetal puede ser estimada a partir del NDVI (Petorelli et al., 2005; Lara y Gandini., 2016; Gaitán et al., 2021; Salvador-Castillo et al., 2021). Considerando esta relación, las diferencias de vegetación mencionadas en los párrafos anteriores, se pueden visualizar en un mosaico de escenas de NDVI de imágenes MODIS (MOD13Q1) para un año en particular. En la Figura 13, se observa para el año 2005, de alta variabilidad de acuerdo al análisis de

estacionalidad de R, que dentro de DC existe un amplio rango de NDVI, diferenciándose claramente las zonas de mallines, estepas y eriales. También puede observarse un patrón similar en Maglione et al., 2021, quienes estimaron la cobertura vegetal a partir de productividad primaria neta (MOD17A3) y temperatura (WORLDCLIM).

Los análisis planteados en este trabajo permitieron describir el comportamiento de la vegetación a través de la curva anual de NDVI y sus atributos en EMS, EMH y CA. Sin embargo, en las otras áreas los patrones no fueron claros, posiblemente debido a la heterogeneidad de la vegetación dentro de cada una de ellas. Para poder observar estas diferencias, sería necesario realizar estos mismos análisis: en pequeñas regiones representativas dentro de cada área ecológica, utilizar como base el mapa de tipos fisionómicos florísticos de la provincia o realizar un análisis temporal de cada pixel en la serie de NDVI.

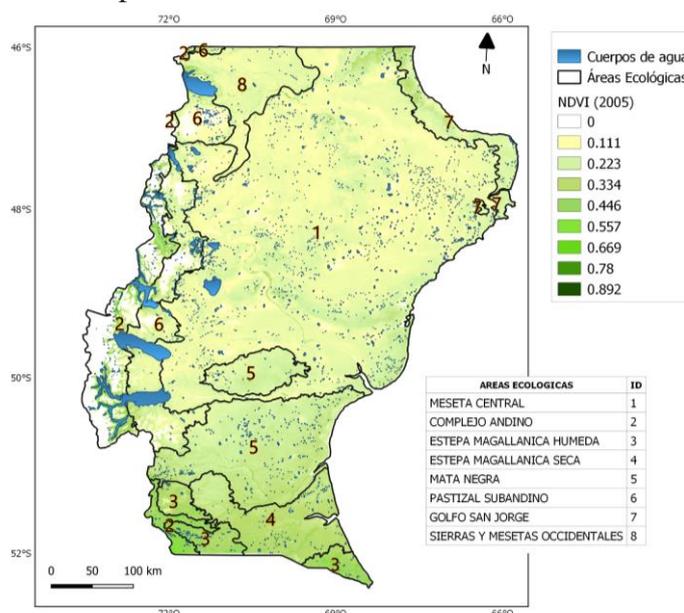


Figura 13. Mapa NDVI por áreas ecológicas para el año 2005 usando MOD13Q1.

En este estudio se trabajó con el supuesto de que los índices de vegetación están relacionados con Productividad Primaria Neta Aérea. Sin embargo, esto debiera corroborarse o ajustarse para cada región. Para ello es necesario correlacionar el valor de NDVI con datos de campo, para lo cual se podrían utilizar estudios existentes o realizar nuevos relevamientos. En el caso de utilizar información existente, se podría relacionar con la información de pastizales (en el caso de Santa Cruz, el relevamiento se realiza solo considerando el estrato intercoironal, que es el más consumido por el ganado ovino), clausuras de evaluación de productividad (Red Nacional de Monitoreo de Pastizales INTA, Blanco et al., 2018). Se podría, además, considerar el uso de instrumentos que midan NDVI o reflectancia a campo, para calibrar la información satelital y lograr un mejor ajuste.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- BAETTI, C. (2004). Unidades Fisionómicas y Florísticas de la Vegetación. Editores: González, L., Rial, P. INTA Ediciones, Argentina.
- BECK, P. S., ATZBERGER, C., HØGDA, K. A., JOHANSEN, B., SKIDMORE, A. K. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote sensing of Environment*, 100(3), 321-334.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>

- BLANCO, L. J., DURANTE, M., FERRANTE, D., QUIROGA, R. E., DEMARÍA, M., DIBELLA, C. M. (2018). Red nacional de monitoreo de pastizales naturales de Argentina: Productividad forrajera de la vegetación extra-pampeana. *Revista RIA* (In press).
- BUONO, G. G., UTRILLA, V. R., NAKAMATSU, V. B., VILLA, M. D. (2020). Métodos de evaluación de los mallines patagónicos: Botanal y Pasturómetro. Ediciones INTA.
- CARVACHO BART, L., SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. (2010): Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1.
- CATALÁN, C. E. (2004). Series Temporales. Laboratorio de Estadística. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). España, 54.
- CUADRA, D. E., OLIVA, G. (1996). Ambientes naturales de la provincia de Santa Cruz. *Espacios*, 6, 22-27.
- DANS, S., CEFARELLI, A., GALVÁN, D., GONGORA, M., MARTOS, P., VARISCO, M. (2020) Programa de Investigación y Monitoreo del Golfo San Jorge. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Libro digital, PD.
- GAITÁN, J.J., BRAN, D., OLIVA, G., CIARI, G., et al. (2013). Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators* 34: 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.05.007>
- GAITÁN, J. J., DONALDO BRAN, D. E., AZCONA, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *Agriscientia*, 32(2), 83-93. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v32.n2.16559>
- GAITÁN, J., CIANO, N., OLIVA, G., BRAN, D., BUTTI, L., CARIAC, G., C., et al. (2021). La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas*, 30(3), 2229. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2229>.
- GALLEGO, F., LEZAMA, F., PEZZANI, F., LÓPEZ-MÁRSICO, L., LEONI, E., MELLO, A. L., & COSTA, B. (2017). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay. *Agrociencia* (Uruguay), 21(1), 120-130. <https://doi.org/10.31285/AGRO.21.1.14>
- HUETE, A. R (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., FERREIRA, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- JOBBÁGY, E. G., PARUELO, J. M., LEÓN, R. J. (1995). Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. *Ecología Austral*, 5(01), 047-053.
- KAUFMAN, Y. J., TANRÉ, D. (1992). Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 30(2), 261-270. <https://doi.org/10.1109/36.134076>
- LARA, B. D., GANDINI, M. L. (2016). Caracterización del comportamiento fenológico de las coberturas vegetales en un sector de la Pampa Deprimida (Argentina): una aproximación utilizando series temporales de NDVI. *Ambiencia*, 12(4), 765-783.

- LEÓN, R. J., BRAN, D., COLLANTES, M., PARUELO, J. M., SORIANO, A. (1998). Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología austral*, 8(2), 125-144.
- MAGLIONE, D., PAREDES, P., KLIMISCH, B., GUTIÉRREZ, F., SOTO, J. (2021). Mapa de cobertura vegetal a partir de sensores remotos y datos de campo para Santa Cruz (Argentina). Ponencia presentada en Jornada de Avances en Métodos Estadísticos, Colombia.
- OLIVA, G., GONZÁLEZ L., RIAL, P., LIVRAGHI, E. (2001). Áreas ecológicas de Santa Cruz y Tierra del Fuego. En P. Borrelli y G. Oliva. *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral. Tecnología de manejo extensivo*. Buenos Aires: INTA., p. 41-62.
- OYARZABAL, M., CLAVIJO, J., OAKLEY, L., BIGANZOLI, F., TOGNETTI, P., BARBERIS, I., et al. (2018). Unidades de Vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28, 40-63. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.399>.
- PAREDES, P. N. (2011). Caracterización funcional de la Estepa Magallánica y su transición a Matorral de Mata Negra (Patagonia Austral) a partir de imágenes de resolución espacial intermedia. Tesis de Maestría Doctoral, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- PARUELO, J. M., JOBBÁGY, E. G., SALA, O. E. (1998). Biozones of patagonia (Argentina). *Ecología Austral*, 8(02), 145-153.
- PARUELO, J. M., LAUENROTH, W. K. (1998). Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 25(4), 721-733. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.2540721.x>
- PARUELO, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3):4-22.
- PARUELO, J., ALCARAZ-SEGURA, D., VOLANTE, J. N. (2011). El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos. Publicado en *Valoración de Servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el Ordenamiento Territorial*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Págs, 141-162.
- PETTORELLI, N., VIK, J. O., MYSTERUD, A., GAILLARD, J. M., TUCKER, C. J., STENSETH, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- R CORE TEAM. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RIAL, P., GONZÁLEZ, L. (2000). Mosaico de imágenes Landsat Tm de la Provincia de Santa Cruz, Argentina. *Actas del X Congreso Nacional de Cartografía*. Instituto Geográfico Militar. Buenos Aires, p. 72-80.
- SALVADOR-CASTILLO, J., BOLAÑOS-GONZÁLEZ, M., PALACIOS-VÉLEZ, E., PALACIOS-SÁNCHEZ, L. A., LÓPEZ-PÉREZ, A., MUÑOZ-PÉREZ, J. M. (2021). Estimación de la fracción de cobertura vegetal y contenido de nitrógeno del dosel en maíz mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, 39, p 899. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.899>
- SCHENKEL, C. A., OLIVA, G. E., PAREDES, P. N., HUMANO, G., FERRANTE, D. (2021). Cartografía de un nuevo Modelo de Estados y Transiciones de la Estepa Magallánica Seca en la Patagonia argentina. *Ecología Austral*, 31(2), 301-315. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1015>
- TUCKER, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*: 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

TUCKER, C.J., TOWNSHEND, J.R., GOFF, T.E. (1985). African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369-375. <https://doi.org/10.1126/science.227.4685.369>